Journal of Horticultural Science
https://jhs.um.ac.ir

Research Article
Vol. 39, No. 1, Spring 2025, p. 31-56

Effects of Amino Acids on Morpho-physiological and Essential Oil Attributes of *Satureja bachtiarica* Bunge. under Water Deficit Conditions

M. Yadegari [1*]

1- Research Center of Nutrition and Organic Products (R.C.N.O.P), Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran
(*- Corresponding author's Email: mehrabyadegari@gmail.com)

Received: 19-02-2024 Revised: 18-06-2024 Accepted: 03-08-2024 Available Online: 03-08-2024	**How to cite this article:** Yadegari, M. (2025). Effects of amino acids on morpho-physiological and essential oil attributes of *Satureja bachtiarica* Bunge. under water deficit conditions. *Journal of Horticultural Science*, *39*(1), 31-56. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jhs.2024.86940.1328

Introduction

Satureja bachtiarica is one of the important endemic species and is used in medicinal and food industries. This plant is rich in essential oil, flavonoids, monoterpene glycosides and trypanocidal terpenoids. The main compounds of the essential oil from *S.bachtiarica* L. collected from natural habitats are alpha-pinene, p-cymene, carvacrol and gamma-terpinene. The environmental factors cause changes in the growth, quantity, and quality of active substances (such as alkaloids, glycosides, steroids and volatile oils) in medicinal and aromatic plants. Among environmental stresses, water deficit plays an important role in the biosynthesis of secondary metabolites in medicinal and aromatic plants in arid and semi-arid regions like Iran. Drought stress has detrimental effects on growth and yield and can upset the balance between the antioxidant defense system and free radicals by stimulating a series of biochemical reactions, where free radicals cause cell damage. In sustainable production systems of medicinal and aromatic plants, stable quantitative and qualitative functions can be achieved under conditions of environmental stress and it is possible to improve the production of secondary metabolites in these plants under adverse environmental conditions. Therefore, this study was done to evaluate the amino acids on the physiological and phytochemical properties of *S. bachtiarica* to determine and introduce the best amino acids under water stress.

Materials and Methods

This investigation was done from spring (May) 2022 to fall (September) 2023 at the Research Farm of Islamic Azad University, Branch of Shahrekord (latitude. 32°20′ N, longitude. 50°51′ E, altitude. 2061 m). Based on the Köppen climate classification, the climate of the study area is classified as cold and semiarid. This study was conducted in a randomized complete block design (RCBD) as a split plot layout with three replications. Irrigation regimes (3-day, 6-day, and 9-day intervals) were assigned as the main plots, while the foliar application of amino acids (methionine, lysine, phenylalanine, and proline) was designated as the subplots. In each year, treatments were applied at 3 stages (3 months after sowing, end of vegetation, before flowering, beginning of flowering and early flowering) and harvesting was done in the complete flowering stage. Weed control was applied manually during the entire experiment. During the experiment, no fertilizer and no systemic pesticide and herbicide were used. The harvested shoots were transferred to the laboratory for extracting and analysis of the leaves and stems of treated plants. For assessment of the total chlorophyll content of *S. bachtiarica*, the leaves were extracted with 80% acetone. The absorbance of the extraction was read at 470, 648, and 664 nm, and the content of total chlorophyll was calculated as mg per g leaf dry weight. Total phenol content was measured by the Folin-Ciocalteu reagent as reported by Singleton and Rossi. The total phenol content was expressed as mg of gallic acid equivalent per g leaf dry weight according to standard curves of gallic

https://doi.org/10.22067/jhs.2024.86940.1328

acid. The essential oils were extracted by hydro-distillation and analyzed using GC/MS.

Results and Discussion

Applied amino acids significantly influenced the morpho-physiological and phytochemical characters of *Satureja bachtiarica*. In two years, the highest chlorophyll content (1.41-1.54 $mg.g^{-1}$ FW) and total phenol content (2.45-2.72 $mg.g^{-1}$ FW) were obtained in methionine (2.5 $g.l^{-1}$) and phenylalanine (100 µM) treatments by irrigation regimes 3-day interval. The highest essential oil contents (1.09-1.61 %) were obtained from the plants treated by methionine (2.5 $g.l^{-1}$) and phenylalanine (100 µM) treatments by irrigation regime 3 days interval. The main chemical compounds of essential oil were P-cymene (17.12-19.45 %), gamma-terpinene (18.14-16.87 %) and Carvacrol (45.12-51.24 %) belonging to cyclic monoterpenes. The treatments had significant effectiveness on cyclic monoterpens such as alpha-terpinene, gamma-terpinene, germacren-d, carvacrol, thymol and p-cymene. Increasing of essential oil content/composition by use of amino acids was seen. The main components of essential oil in plants treated by proline were lesser than other treated plants. In two years of this research amino acids of methionine and phenylalanine mad the most amounts of carvacrol and essential oil content. The monoterpene alcohols in volatile oils of the treated plants with amino acids elicitors considerably were higher than the sesquiterpenes. According to the ratio of monoterpenes alcohol to sesquiterpenes in volatile oils of the treated *S. bachtiarica* with different elicitors, the foliar application of amino acids can improve the odor quality of *S. bachtiarica* volatile oil.

Conclusions

Foliar application of methionine (2.5 $g.l^{-1}$) and phenylalanine (100 µM) treatments better than other treatments increased the morpho-physiological and essential oil attributes. Environmental conditions such as drought play a key role in plant growth and biosynthesis of different metabolic compounds. The observed variation in shoot yield and phytochemical content of *S. bachtiarica* during the studied years may related to differences in photoperiod, temperature, solar radiation, precipitation and occurrence of biotic and abiotic stresses at different growing seasons. Also amino acids had very important effectiveness on content/composition of essential oil of *S. bachtiarica*. Generally, treats of methionine and phenylalanine can be a good strategy to improve morpho-physiological characteristics and essential oil quantity and quality of *S. bachtiarica* in the same climate.

Keywords: Carvacrol, Medicinal plant, Methionine, P-cymene, Phenylalanine

نشریه علوم باغبانی
https://jhs.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤، ص. ٥٦-۳۱

تأثیر اسیدهای آمینه بر صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس مرزه بختیاری (*Saturjea bachtiarica* Bunge.) تحت شرایط کم‌آبیاری

مهراب یادگاری[1]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

چکیده

مرزه بختیاری (*Satureja bachtiarica*) از گیاهان با ارزش دارویی و کاربردی در صنایع داروسازی و غذایی کشور می‌باشد. این گیاه در اسانس، فلاونوئید و گلیکوزیدهای مونوترپن‌دار غنی است. ترکیبات اصلی اسانس این گیاه شامل آلفا-پینن، پی-سایمن، کارواکرول و گاما-ترپینن است. پژوهش حاضر در جهت یافتن بهترین تیمارهای محلول‌پاشی اسیدهای آمینه بر صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس گیاه مرزه بختیاری در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد شهرکرد به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام گردید. دوره‌های آبیاری (سه، شش و نه روز یک‌بار) در کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی برگی اسیدهای آمینه (لیزین، متیونین، فنیل آلانین و پرولین) به همراه شاهد در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. در هر سال، در سه مرحله (سه ماه پس از استقرار نشاءها، اواخر رشد رویشی و ابتدای گل‌دهی) محلول‌پاشی انجام شد و در زمان گل‌دهی کامل اقدام به برداشت شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که اسیدهای آمینه به‌طور معنی‌داری بر صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس مرزه بختیاری تأثیر داشتند. بالاترین محتوای کلروفیل (۱/۴۱-۱/۵۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و فنل (۲/۴۵-۲/۷۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در تیمارهای متیونین و فنیل آلانین با دوره آبیاری سه روز یک‌بار به‌دست آمد. بیشترین اسانس (۱/۰۹-۱/۶۱ درصد) از گیاهان تحت تیمار با متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) با دور آبیاری سه روز یک‌بار حاصل شد. ترکیبات اصلی اسانس شامل پی-سایمن (۴۵/۱۲-۱۹/۱۷ درصد)، گاما-ترپینن (۱۸/۱۴-۱۶/۸۷ درصد) و کارواکرول (۴۵/۱۲-۵۱/۲۴ درصد) جزء مونوترپن‌های حلقوی بودند. براساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که اسیدهای آمینه اثر معنی‌داری بر مونوترپن‌های حلقوی مانند آلفا-ترپینن، گاما-ترپینن، کارواکرول، تیمول و پی-سایمن داشتند. افزایش در مقادیر کمّی و کیفی اسانس با کاربرد اسیدهای امینه مشاهده گردید. تیمارهای متیونین و فنیل آلانین بیشترین اثرگذاری را بر مقدار اسانس و کارواکرول گیاهان تحت تیمار داشتند. مقادیر مونوترپن‌های حلقوی در تمام گیاهان تحت تیمار بیشتر از سزکویی ترپن‌ها بودند. تنش‌های محیطی نقش بسزایی در رشد و تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی دارند که از این میان، تنش خشکی منجر به تغییر مقادیر ترکیبات غالب اسانس مرزه بختیاری در پژوهش حاضر شد. محلول‌پاشی متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) برتر از سایر تیمارها منجر به افزایش صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس شد. لذا استفاده از تیمارهای مذکور به‌ویژه متیونین می‌تواند نقش مؤثری در بهبود صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس مرزه بختیاری تحت شرایط اقلیمی مشابه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: پارا-سیمن، فنیل آلانین، کارواکرول، گیاه دارویی، متیونین

مقدمه

مرزه گیاهی از خانواده نعناعیان است که دارای تعداد زیادی گونه و زیرگونه است. مرزه بختیاری (*Satureja bachtiarica* Bunge) از گونه‌های انحصاری مرزه در ایران است. ارتفاع گیاهان این گونه، ۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر با قاعده چوبی، میان‌گره‌های کوتاه، ساقه‌های خاکستری، با کرک‌های کوتاه و نرم، انشعابات گل‌دار افراشته و گل‌ها در خوشه‌ها دارای چندین گل هستند. برگ‌ها به‌صورت مجتمع در طول ساقه قرار گرفته‌اند. رویشگاه طبیعی این گونه در مناطق غرب ایران و از جمله استان چهارمحال و بختیاری است (Mozaffarian,

۱- مرکز تحقیقات تغذیه و محصولات ارگانیک، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران
(* - نویسنده مسئول: Email: mehrabyadegari@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/jhs.2024.86940.1328

2008). ترکیبات شیمیایی موجود در مرزه شامل کارواکرول[1]، پی-سایمن[2]، آلفا و گاما-ترپینن[3]، ژرماکرن-دی[4] و تیمول[5] می‌باشد (Yadegari, 2022). کاشت مرزه در اوایل بهار و وجود حداقل تنش رطوبتی (۲۵ درصد تبخیر از تشت تبخیر کلاس A) منجر به حداکثر عملکرد کمّی و کیفی این گیاه می‌شود (Padid *et al.*, 2021). همچنین تراکم بالا و استفاده از کودهای زیستی منجر به افزایش عملکرد این گیاه دارویی می‌شود (Mirjalili *et al.*, 2020). مرزه بختیاری به‌عنوان گونه‌ای نسبتاً متحمل به کمبود آب شناخته شده است (Jafari *et al.*, 2021). ویژگی‌های رشد و عملکرد گیاهان دارویی و معطر از جمله ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی، متأثر از عوامل ژنتیکی، تغییرات محیطی و مدیریتی و اثرات متقابل آن‌ها است. با توجه به استفاده مستقیم از گیاهان دارویی توسط انسان، استفاده از کودهای شیمیایی نه‌تنها منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌گردد، بلکه سلامت انسان را در مخاطره شدید قرار می‌دهد. با رویکرد حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار، استفاده از اسیدهای آمینه در تولید گیاهان دارویی می‌تواند منجر به افزایش کمّی و کیفی آن‌ها و گامی مؤثر در راستای کشاورزی پایدار و حفظ محیط زیست باشد (Azarpira *et al.*, 2020; Mirjalili *et al.*, 2020). اثرات مفید موادی مانند آمینواسید، اسید هیومیک و اسید فولویک در رشد، افزایش عملکرد، بهبود کمّی و کیفی محصول و مقاومت گیاهان به تنش‌های زنده و غیرزنده به اثبات رسیده است. میزان عناصر غذایی در مواد محرک رشد کم یا ناچیز است و این مواد به شیوه‌های دیگری به‌غیر از تأمین مواد مغذی مورد احتیاج گیاه، باعث اثرات مفید در رشد و فیزیولوژی گیاه می‌شوند. تأثیر این مواد در گیاهان مختلف و مناطق متفاوت و حتی در ارقام متنوع یک گیاه ممکن است متفاوت باشد (Taraseviciene, 2021).

از سوی دیگر با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک، تنش آب یکی از مسائل محدودکننده رشدونمو گیاهان است. تنش نسبی آب منجر به افزایش مقادیر اسانس گیاهان دارویی آویشن دنایی (*Thymus daenensis*) و باغی (*Thymus vulgaris*) (Askary *et al.*, 2018)، ترخون (*Artemisia dracunculus* L.) (Mumivand *et al.*, 2021)، استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni) (Khorasani *et al.*, 2023)، اسانس و ماده مؤثره تیمول، مالون دی آلدئید و فنل در همیشه بهار مکزیکی (*Tagetes minuta* L.) (Babaei *et al.*, 2021)، افزایش راندمان مصرف آب، اسیدهای فنولی، فلاونوئید و کربوهیدرات‌های محلول در آب در لولیوم (*Lolium multiflorum*) و فستوکا (*Festuca arundinacea*) (Fariaszewska *et al.*, 2020)، کاهش پتانسیل آب برگ و فتوسنتز خالص و افزایش سزکویی‌ترپن‌ها در مریم گلی (*Salvia dolomitica* Codd.) (Caser *et al.*, 2019) می‌شود. این تنش منجر به افزایش مقادیر آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز دیسموتاز و پرولین در گیاه سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) (Hayati *et al.*, 2021)، آنزیم آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در گیاه بادرشبویه (*Dracocephalum moldavica*) (Ghanbarzadeh *et al.*, 2019) شده است. گیاهان تحت تنش خشکی، متابولیت‌هایی تولید می‌نمایند که از آن‌ها در مقابل رادیکال‌های آزاد از جمله اکسیژن رادیکال محافظت نموده و از کاهش فتوسنتز جلوگیری می‌نمایند. یاخته‌های گیاهی برای کاهش تأثیر تخریبی این مولکول‌ها، فعالیت سامانه آنتی‌اکسیدانی خود از جمله ۲ و ۲-دی فنیل، ۱- پیکریل هیدرازیل[6] را افزایش می‌دهند. در این میان، نقش اسیدهای آمینه از جمله فنیل آلانین بسیار حائز اهمیت است (Albergaria *et al.*, 2020; Gohari *et al.*, 2020). در تنش خشکی، اسیدهای آمینه، قندها و متابولیسم تحت تأثیر قرار می‌گیرند. ازآنجاکه تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان به‌وسیله عوامل محیطی تغییر می‌یابد و در این بین، تنش رطوبتی عامل مؤثری در کاهش رشد و همچنین ساخت ترکیبات طبیعی گیاهان دارویی می‌باشد (Khorasani *et al.*, 2023; Jafari *et al.*, 2021)، لذا ارائه روش‌هایی که گیاه، بتواند ماده مؤثره بیشتر تولید نماید، ضروری به نظر می‌رسد. از جمله روش‌هایی که به‌منظور افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه از جمله ترپنوئیدها به‌کار می‌رود، استفاده از محرک‌های زیستی و غیرزیستی است (Moradi *et al.*, 2018; Marjaneh *et al.*, 2018; Shaykh Samani *et al.*, 2023).

کاربرد اسیدهای آمینه به‌میزان محدود و در غلظت‌های پایین، ساخت ترکیبات خاصی را در سلول زنده، تحریک یا بهبود بخشیده و زمان دستیابی به مقادیر بالای متابولیت‌های ثانویه را کاهش می‌دهد. افزایش راندمان مصرف آب، کاهش تنفس نوری، افزایش سطح و دوام برگ و در نهایت، افزایش عملکرد از اثرات این اسیدهای آمینه است (Kheiri *et al.*, 2020; Yadegari, 2022). تیمار گیاهان با اسیدهای آمینه، مشابه حمله عوامل بیماری‌زا، موجب بروز آرایشی از عکس‌العمل‌های دفاعی، از قبیل تجمع مجموعه‌ای از متابولیت‌های ثانویه‌ی دفاعی در گیاه می‌شود. محرک‌های رشد در گیاه به‌مقدار کمی وجود دارند، امّا برای رشدونمو گیاه ضروری بوده و رشدونمو گیاهان در معرض آن‌ها تغییر می‌کند (Asadi *et al.*, 2018;

1- Carvacrol
2- P-cymene
3- Alpha/Gamma terpinene
4- Germacren-D
5- Thymol

6- 2, 2- diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)

Aminifard *et al.*, 2020). اسیدهای آمینه به‌عنوان ترکیب‌های محرک رشد کمّی و کیفی گیاه فعالیت می‌کنند. این ترکیب‌ها در زیست‌ساخت متابولیت‌های ثانویه و هورمونی نقش مهمی دارند (Nouri *et al.*, 2015; Poorghadir *et al.*, 2020). کاربرد محرک‌های زیستی می‌تواند یکی از مهم‌ترین عوامل در کشت موفق یک گیاه دارویی باشد. اسیدهای آمینه علاوه‌بر افزایش شاخص‌های کمّی، بر شاخص‌های کیفی گیاه دارویی نیز مؤثر واقع می‌شوند که این تأثیر ناشی از نقش ساختاری اسیدهای آمینه در کارکرد گیاهی است. اسیدهای آمینه، مولکول‌های دوقطبی با فرمول مشترک $C_2H_4O_2NR$ بوده و نقش آن‌ها به‌عنوان مولکول‌های زیستی و پیش‌سازهای ساختمان پروتئین‌ها است که تمام عملکرد گیاه اعم از ساختاری، آنزیمی، متابولیکی و انتقال را برعهده دارند. آن‌ها اغلب در ساخت انواع زیادی از مولکول‌های کوچک با نقش زیستی بسیار مهم می‌باشند. استراتژی تجزیه اسیدهای آمینه، تشکیل متابولیت‌های حدواسط است که ترکیبات فوق به گلوکز تبدیل شده یا در چرخه اسیدسیتریک اکسیده می‌شوند. اسکلت کربنی آن‌ها در نهایت به هفت مولکول پیروات، استیل کوآ، استو استیل کوآ، آلفا – کتوگلوتارات، سوکسینیل کوآ، فومارات و اگزالواستات و یا یکی از متابولیت‌های حدواسط سیکل اوره تبدیل می‌شوند (Nouri *et al.*, 2015). از سنتز شیمیایی نیز برای تولید اسیدآمینه‌های خاص یا مخلوطی از آن‌ها می‌توان بهره برد. ترکیبات نیتروژنه زیادی مانند بتائین‌ها، پلی‌آمین‌ها و اسیدهای آمینه غیرپروتئینی در گیاهان عالی وجود دارند که اثرات مثبت بعضی از آن‌ها در مقابله با تنش‌ها به اثبات رسیده است. هرکدام از این ترکیبات از چند شیوه، نقش محرک رشدی خود را ایفا می‌کنند. برخی از اسیدهای آمینه دارای خاصیت کلات‌کنندگی می‌باشند و می‌توانند به تحرک عناصر کم‌مصرف و جذب آن‌ها در خاک کمک کنند. گیاهان می‌توانند از طریق ریشه و برگ، اسیدهای آمینه و پپتیدها را به‌صورت مؤثری جذب کنند. تحقیقات علمی نشان می‌دهند که این ترکیبات موجب افزایش عملکرد، بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش رشد گیاه می‌شوند (Azarpira *et al.*, 2020). منابع قابل توجهی وجود دارد که نشان می‌دهد، هیدرولیز پروتئینی و اسیدهای آمینه خاص از جمله پرولین، بتائین و مشتقات آن‌ها و مواد اولیه حاصل از آن‌ها، می‌توانند سیستم دفاعی گیاه را تحریک کنند و باعث افزایش تحمل گیاه به انواع مختلف تنش‌های غیرزنده از جمله شوری، خشکی، دما و شرایط اکسیدکننده گردند. گیاهان با تولید آنزیم‌های مختلف علاوه‌بر انجام فرآیندهای بیوشیمیایی با تنش‌های محیطی هم مقابله می‌کنند (Danesh Shahraki *et al.*, 2023). وجود اسیدهای آمینه آزاد برای رفع تنش در گیاه ضروری است. اسیدهای آمینه گلایسین، بتائین و پرولین، به‌عنوان محافظ اسمزی، عمل می‌نمایند و باعث تثبیت پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و غشاءها در برابر اثرات غیرطبیعی تنش آبی و دماهای زیاد شده و باعث کاهش اثرات منفی گروه‌های اکسیژن رادیکال شوند. اسیدهای آمینه دیگر نیز در مقاومت به تنش‌های غیرزیستی مؤثرند (Nouri *et al.*, 2015). هیدرولیزهای پروتئینی بر متابولیسم نیتروژن و کربن اثر گذاشته و باعث بهبود آن شده و احیاء و جذب نیتروژن را نیز افزایش می‌دهند. تأثیر بر متابولیسم نیتروژن و کربن، به‌عنوان اثر مستقیم این مواد در نظر گرفته می‌شود. افزایش پروتئین در زمان کاربرد این مواد به این دلیل است که اسیدهای آمینه مستقیماً می‌توانند در ساخت پروتئین استفاده شده و در افزایش غلظت کربوهیدرات برگ اثر نمایند. کربوهیدرات‌ها به‌عنوان اسکلت کربنی، برای اتصال نیترات احیاشده (آمونیوم) در اسیدهای آمینه بوده و باعث افزایش ساخت پروتئین می‌گردند (Wafaa *et al.*, 2021; Shafie *et al.*, 2021). ترکیبات حاصل از هیدرولیز پروتئینی، می‌توانند باعث بهبود احیاء و جذب درونی نیتروژن شوند و این کار را از طریق تعامل با تنظیم متابولیسم کربن و نیتروژن انجام می‌دهند (Boohlman & Keeling, 2008). اسیدهای آمینه برای فرآیندهای فیزیولوژیک و سوخت‌وساز دارای اهمیت هستند، زیرا از اجزاء آنزیم‌ها هستند و سنتز ناکافی اسیدهای آمینه ضروری ممکن است منجر به ایجاد تنش و تأثیر نامطلوب بر سوخت‌وساز سلولی و رشد شود (Esch *et al.*, 2019). اسیدهای آمینه ضروری در گیاهان شامل هستیدین، ایزولوسین، لوسین، لیزین، متیونین، فنیل آلانین، تریونین و تریپتوفان و از اسیدهای آمینه غیرضروری می‌توان آلانین، آرژینین، آسپارژین، سیستئین، گلوتامین، گلیسین، پرولین، سرین و تیروسین را نام برد. از اسیدهای آمینه رایج مورد استفاده در کشاورزی می‌توان پرولین، لیزین و متیونین را نام برد. پرولین یک اسید آمینه غیرضروری است که به‌عنوان یک محافظ اسمز عمل می‌کند و به گیاهان کمک می‌کند تا با خشکی، شوری و دمای بالا کنار آیند، در تنظیم اسمزی سلولی نقش دارد و از گیاهان در برابر تنش اکسیداتیو محافظت می‌کند. پرولین همچنین به سنتز پروتئین‌ها و آنزیم‌های دخیل در پاسخ‌های تنش کمک می‌کند (Danesh Shahraki *et al.*, 2023; Darvizheh *et al.*, 2017). لیزین نیز یک اسید آمینه ضروری محسوب می شود که نقش مهمی در سنتز پروتئین و رشد گیاه دارد. در تنظیم باز شدن روزنه‌های برگ، جوانه‌زنی، ساخت کلروفیل، متابولیسم نیتروژن، تولید آنزیم‌ها و هورمون‌ها مهم است. لیزین همچنین باعث افزایش تحمل گیاه به شرایط تنش مانند دماهای بالا و کمبود آب می‌شود و موجب افزایش عملکرد کمّی و کیفی گیاهان می‌شود (Ashouri *et al.*, 2023). متیونین نیز یکی از اسید آمینه ضروری است که در فرآیندهای متابولیکی مختلف در گیاهان نقش

دارد. این ماده پیش‌ساز تنظیم‌کننده‌های رشد مانند اتیلن، اکسین، سیتوکنین و براسینواستروئیدها است که رسیدن و پیری میوه را تنظیم می‌کند. متیونین همچنین در متابولیسم گوگرد نقش دارد و برای سنتز پروتئین مهم است (Ashouri *et al.*, 2023). کاربرد اسیدهای آمینه منجر به افزایش مقادیر صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاهان نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) (Asadi *et al.*, 2018)، سیر (*Allium sativum* L.) (Heidarzadeh *et al.*, 2023)، ریحان (*Ocimum sativum* L.) (Ajdanian *et al.*, 2019)، انگور (*Vitis vinifera* var. Hosseini.) (Gohari *et al.*, 2020)، عروسک پشت پرده (*Physalis alkekengi* L.) (Saremi *et al.*, 2021)، اسانس و برخی ترکیبات اسانس گیاهان گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) (Aminifard *et al.*, 2020)، رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) (Moradi Marjaneh *et al.*, 2018)، زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) (Hazrati *et al.*, 2021)، شوید (*Coriandrum sativum* L.) (Wafaa *et al.*, 2021)، زوفا (*Hyssopus officinalis* L. subsp. *angustifolius*) (Aghaei *et al.*, 2021)، آویشن دنایی (*Thymus daenensis* L.) (Kazempour *et al.*, 2023) و همیشه بهار آفریقایی (*Tagetes erecta* L.) (Raoof Haghparvar *et al.*, 2022) شده است.

با توجه به بررسی منابع، تاکنون تحقیق جامعی راجع به اثرگذاری محلول‌پاشی اسیدهای آمینه بر صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس مرزه بختیاری در جهت تحمل به تنش خشکی انجام نشده است. این پژوهش در جهت یافتن بهترین نوع و مقدار محلول‌پاشی اسید آمینه از بین اسیدهای آمینه لیزین، متیونین، فنیل آلانین و پرولین برای به‌دست آوردن بالاترین مقادیر صفات مورفوفیزیولوژیکی و کمیت و کیفیت اسانس در این گونه مهم دارویی تحت سطوح مختلف تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

طرح تحقیق و مشخصات تیمارها: پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی پژوهشی شهرکرد با مشخصات عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۰۶۱ متر از سطح دریا انجام گردید. خصوصیات اقلیمی و خاک‌شناسی منطقه در جدول ۱ و خصوصیات آب آبیاری در جدول ۲ آمده است. طی دو سال زراعی، تیمارهای اسیدهای آمینه شامل متیونین، لیزین، فنیل آلانین و پرولین و شاهد (بدون هر نوع محلول‌پاشی) برای این پژوهش انتخاب شد. پژوهش به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه سطح آبیاری (سه، شش و نه روز یک‌بار) به‌عنوان کرت‌های اصلی و تیمارهای محلول‌پاشی برگی (لیزین در دو سطح ۲/۵ و پنج گرم در لیتر، متیونین در دو سطح ۲/۵ و پنج گرم در لیتر، فنیل آلانین در دو سطح ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار، پرولین در دو سطح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار و یک سطح شاهد) به‌عنوان کرت‌های فرعی در سه مرحله (سه ماه پس از استقرار نشاءها، اواخر رشد رویشی و ابتدای گل‌دهی) انجام شد. محلول‌پاشی اسیدهای آمینه لیزین (۷۸ درصدی خالص پودری تولیدشده توسط شرکت آجینوموتو) و متیونین (۹۹ درصدی خالص پودری تولیدشده توسط شرکت دگوسا) به‌میزان ۲/۵ و ۵ گرم در یک لیتر آب انجام شد (Ashouri *et al.*, 2023). فنیل آلانین در دو سطح ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار به‌کار گرفته شد. پودر این ماده در اسید استیک پنج درصد حل شده و سپس با استفاده از آب مقطر به غلظت‌های مورد نظر رسانده شد. اسید آمینه پرولین (۹۵ درصد خالص پودری تولیدشده توسط شرکت مرک آلمان) در دو سطح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار مورد استفاده قرار گرفت (Shaykh Samani *et al.*, 2023; Raoof Haghparvar *et al.*, 2022). از ترکیب خیساننده تجاری توئین ۲۰ پلی سوربات شرکت مرک آلمان نیز به‌عنوان سورفکتانت جهت افزایش جذب ترکیبات به‌کاررفته در این تحقیق استفاده شد (Aghaei *et al.*, 2021; Gohari *et al.*, 2020).

کاشت گیاه: زمین مورد نظر در پاییز شخم زده شد. در بهار پس از مساعد شدن شرایط آب‌وهوایی، اقدام به آماده‌سازی زمین برای کاشت گردید. مساحت هر کرت فرعی، ۱۲ مترمربع (ابعاد سه و چهار متر)، هر کرت اصلی، ۱۰۸ مترمربع (ابعاد ۹ و ۱۲ متر) و هر تکرار، ۳۲۴ مترمربع (ابعاد ۱۰۸ و ۳ متر) بود. مساحت کل طرح (سه تکرار) بدون فواصل بین کرت‌ها و تکرارها ۹۷۲ مترمربع و با احتساب فواصل بین کرت‌ها و تکرارها ۱۵۵۰ مترمربع بود. نشاءهای ۴-۶ برگی گونه مرزه بختیاری تهیه‌شده از شرکت پاکان بذر، در سال اول در تاریخ ۱۹ اردیبهشت ماه و در سال دوم در ۲۲ اردیبهشت ماه در کرت‌های آزمایشی کاشت شدند و بلافاصله آبیاری انجام شد.

برداشت گیاهان: نمونه‌های گیاهی، در زمان گل‌دهی کامل به‌طور جداگانه از هرکدام از تیمارهای تحت آزمایش در سال اول در ۱۷ شهریورماه و در سال دوم در ۱۴ شهریورماه جمع‌آوری گردید. همچنین از برگ گیاهان تیمارشده جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی، نمونه‌برداری انجام گرفت و نمونه‌های برداشت‌شده در مزرعه بلافاصله در فویل آلومینیومی پیچیده و بعد از برچسب‌زدن نام تیمار در تانک حاوی نیتروژن مایع قرار داده و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها، اندام‌های هوایی گیاه از تمامی زوائد اضافی و خاک تمیز شدند. نمونه‌ها (از هر تیمار تعداد ۱۰ شاخسار

کامل گیاهی) در سایه با تهویه مناسب و در دمای معمولی اتاق (۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد) به‌طور کامل خشک شدند (Yadegari, 2022).

جدول ۱- مشخصات خاک‌شناسی و اقلیمی محل پژوهش

Table 1- Soil physicochemical and climatic properties of experimental field

خصوصیات Properties	سال Year 2022	2023
فسفر P (ppm)	82	83
پتاسیم K(ppm)	209.2	212
نیتروژن N (ppm)	0.09	0.08
هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	0.41	0.42
کربن آلی Organic carbon (%)	0.77	0.85
pH	7.4	7.3
میانگین بارندگی Average rainfall (mm)	311.1	309.3
میانگین دما Average temperature (°C)	11.6	11.2
میانگین حداکثر دما Average maximum temperature (°C)	22.6	21.8
میانگین حداقل دما Average minimum temperature (°C)	-12.4	-12.1

جدول ۲- مشخصات آب مورد استفاده جهت آبیاری

Table 2- Water properties used for irrigation

بی‌کربنات HCO_3^- ($meq.l^{-1}$)	کلر Cl^- ($meq.l^{-1}$)	منیزیم Mg^{2+} ($meq.l^{-1}$)	کلسیم Ca^{2+} ($meq.l^{-1}$)	پتاسیم K^+ ($meq.l^{-1}$)	سدیم Na^+ ($meq.l^{-1}$)	کل املاح محلول TDS ($mg.l^{-1}$)	هدایت الکتریکی E.C ($\mu s.cm^{-1}$)	اسیدیته pH
3.42	0.91	1.43	2.28	0.16	0.763	247.93	387	8.11

ادامه جدول ۲- مشخصات آب مورد استفاده جهت آبیاری

Table 2- Continued- water properties used for irrigation

نیترات NO_3^- ($meq.l^{-1}$)	روی Zn ($meq.l^{-1}$)	منگنز Mn ($meq.l^{-1}$)	مس Cu ($meq.l^{-1}$)	آهن Fe ($meq.l^{-1}$)	کادمیوم Cd ($meq.l^{-1}$)	سولفات SO_4^{2-} ($meq.l^{-1}$)	کربنات CO_3^{2-} ($meq.l^{-1}$)
23.67	0.001	0.001	0.001	0.009	0	0.001	0.21

اندازه‌گیری صفات مورد ارزیابی: کلروفیل کل با استفاده از معادله‌های ۱ و ۲ ارائه‌شده در منابع علمی توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر Varian، مدل CARY-100 به شرح ذیل محاسبه گردید که در این معادلات، A663 و A645: به‌ترتیب، میزان قرائت‌شده جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر است. در نهایت، غلظت رنگیزه‌ها در نمونه‌های برگ به کمک معادله ۲، بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ محاسبه شد. Cx: غلظت محاسبه‌شده رنگیزه (میلی‌گرم در لیتر)، Ve: حجم کل عصاره (میلی‌لیتر)، D: فاکتور رقت و Ws: وزن تر نمونه برگ (گرم) است (Dere *et al.*, 1998).

$$\text{Chl total (mgr/l)} = (20.21 \times A645) + (8.02 \times A663) \quad (۱)$$

$$\text{رنگیزه برگ (میلی‌گرم در گرم وزن تر)} = Cx \times Ve \times D / Ws \times 1000 \quad (۲)$$

پرولین نمونه‌های گیاهی توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۵ نانومتر و با استفاده از تولوئن به‌عنوان محلول مرجع، از طریق معادله ۳ محاسبه شد (De Sousa *et al.*, 2020). عدد ۱۱۵/۵ وزن مولکولی پرولین براساس میکروگرم در میکرومول است.

(۳)

[۱۱۵/۵/حجم عصاره (میلی‌لیتر)× پرولین عصاره (میکروگرم در میلی‌لیتر)]
]×وزن نمونه(گرم)/۵/]

محتوای ترکیبات فنل کل با استفاده از معرف فولین- سیوکالتو اندازه‌گیری شد. ابتدا به ۰/۲ میلی‌لیتر از عصاره‌های مختلف محلول استاندارد اسید گالیک (صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، ۱/۸ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر و ۰/۲ میلی‌لیتر معرف فولین- سیوکالتو (رقیق‌شده با نسبت ۱ به ۱۵) اضافه و به‌خوبی مخلوط گردید. پس از گذشت پنج دقیقه، ۰/۲ میلی‌لیتر محلول سدیم بی‌کربنات هفت درصد و ۰/۸ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر به محلول اضافه شد و ۹۰ دقیقه در دمای اتاق و شرایط تاریکی نگهداری شد. سپس جذب نمونه‌ها در ۷۵۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (ساخت کشور آمریکا مدل پرکلین المر) قرائت و محتوای ترکیبات فنلی کل عصاره‌ها بر حسب میلی‌گرم اسید گالیک به کیلوگرم وزن تر اندام هوایی محاسبه گردید (Marinova *et al.*, 2005).

برای اسانس‌گیری، پس از برداشت نمونه‌های گیاهی، به‌منظور محافظت نوری نمونه‌ها و حداقل آسیب به کیفیت اسانس، ساختارهای هوایی در پاکت‌های کاغذی جمع‌آوری شدند و به‌روش هوای آزاد در سایه با دمای معمولی ۳۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد کاملاً خشک شدند. بعد از خشک شدن ساختارهای هوایی، اقدام به خرد کردن اندام‌های گیاهی گردید. سپس مقدار ۳۰۰ گرم از هر نمونه با ترازوی دیجیتالی مدل سارتوریس ساخت کشور آلمان با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد. اسانس‌گیری به‌روش تقطیر با آب، توسط دستگاه کلونجر (بروسیلیکات آلمانی ساخت شیشه‌آلات ایران) و محاسبه مقدار اسانس براساس درصد وزنی/وزنی صورت گرفت (Adams, 2007). اسانس گیاهان مورد نظر پس از آماده‌سازی، جهت شناسایی ترکیبات به دستگاه GC/MS (مدل 7890A/5975C ساخت اجیلنت آمریکا) مجهز به ستون موئینهHP-5MS به‌طول ۳۰ متر و قطر داخلی ۰/۲۵ میکرون با محدوده دمایی آون ستون از ۶۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد تزریق گردید. شناسایی طیف‌ها به کمک شاخص بازداری آن‌ها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود درکتب مرجع (Adams, 2007) و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیبات استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه کامپیوتری (Wiley and NIST) صورت گرفت.

محاسبات آماری: پس از انجام آزمون همگنی واریانس‌های خطای آزمایشی (بارتلت) و مشخص شدن عدم معنی‌داری در هر دو سال، تجزیه مرکب اطلاعات حاصل از پژوهش به‌واسطه نرم‌افزار آماری $SAS_{ver.9}$ انجام شد. مقایسه‌های میانگین اسانس و ترکیبات اسانس به‌روش حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح یک درصد انجام شد و برای اطمینان از مقادیر خطای استاندارد (SE)، برآورد مجدد نیز به‌طور جداگانه توسط نرم‌افزار Excel ver. 2013 انجام شد.

نتایج و بحث

صفات مورفوفیزیولوژیکی: نتایج دو ساله اطلاعات حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان عملکرد ساختار هوایی، تعداد شاخه اصلی، محتوای نسبی آب برگ، مقادیر کلروفیل، پرولین و فنل کل گیاهان مرزه تحت تأثیر تیمارهای مورد استفاده در این تحقیق، تغیرات چشم‌گیری داشتند (جدول ۳) و در گروه‌های مختلف قرار گرفتند (جدول ۴). تیمار متیونین (۲/۵ گرم در لیتر)، میزان عملکرد ساختار هوایی را به ۳۵۵/۵۵ کیلوگرم در هکتار و در سال دوم به ۴۱۲/۲۳ کیلوگرم در هکتار در دور آبیاری سه روز یک‌بار رساند. عملکرد ساختار هوایی شاهد در دو سال انجام پژوهش به‌ترتیب به‌میزان ۱۲۱/۵۵ و ۱۸۱/۲ کیلوگرم در هکتار در دور آبیاری نه روز یک‌بار بود، لذا استفاده از تیمارهای متیونین و فنیل آلانین و کاهش دور آبیاری از نه به سه روز یک‌بار در هر دو سال انجام تحقیق، افزایش معنی‌دار در عملکرد ماده خشک ایجاد نمود. در دیگر صفات مورفوفیزیولوژیکی مانند محتوای نسبی آب برگ، کل فنل، کل کلروفیل و تعداد شاخه اصلی در تمام دورهای آبیاری، کاربرد تیمارهای متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) منجر به افزایش معنی‌دار گردید. در این ارتباط، تیمار لیزین (۲/۵ گرم در لیتر) نیز در گروه مشابه با برترین تیمارها (در مورد صفات کل فنل، کل کلروفیل و تعداد شاخه اصلی) قرار گرفت (جدول ۴).

میزان پرولین در سال نخست تحت شاهد و محلول‌پاشی پرولین (۱۰۰۰ میکرومولار) در دور آبیاری نه روز یک‌بار، به بیشترین میزان (۱۱/۲۴ میکروگرم در گرم ماده تر) رسید، درحالی‌که در همین سال کمترین مقدار آن (۶/۹۵ میکروگرم در گرم ماده تر) در تیمارهای متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) در دور آبیاری سه روز یک‌بار حاصل گردید. در سال دوم، بیشترین میزان پرولین (۱۲/۹۴ میکروگرم در گرم ماده تر) تحت دور آبیاری نه روز یک‌بار در تیمار پرولین (۱۰۰۰ میکرومولار) به‌دست آمد و کمترین میزان آن (۶/۱۴ میکروگرم در گرم ماده تر) در تیمارهای متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) تحت دور آبیاری سه روز حاصل شد (جدول ۴). در مورد فنل کل، در سال نخست،

بیشترین میزان (۲/۴۵ میلی‌گرم در لیتر) در تیمارهای فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) و لیزین (۲/۵ گرم در لیتر) در دور آبیاری شش روز یک‌بار و کمترین مقدار (۱/۴۴ میلی‌گرم در لیتر) در شاهد در دور آبیاری نه روز یک‌بار به‌دست آمد. در سال دوم بیشترین میزان فنل کل (۲/۷۲ میلی‌گرم در لیتر) در تیمارهای فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) و لیزین (۲/۵ گرم در لیتر) در دورهای آبیاری سه و شش روز یک‌بار و کمترین مقدار (۱/۴۵ میلی‌گرم در لیتر) در شاهد در دور آبیاری نه روز یک‌بار به‌دست آمد (جدول ۴). در مورد صفت میزان محتوای نسبی آب، مشاهده گردید که بیشترین میزان (۵۸/۹۸ درصد) در سال اول و (۶۲/۷۷ درصد) در سال دوم در تیمارهای متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) تحت دور آبیاری سه روز و کمترین مقادیر این صفت در دو سال انجام تحقیق (۲۴/۳۴ – ۲۴/۵ درصد) در تیمارهای شاهد و محلول‌پاشی پرولین (۱۰۰۰ میکرومولار) تحت دور آبیاری نه روز یک‌بار به‌دست آمد (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه مرکب (میانگین مربعات) صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه مرزه بختیاری

Table 3- Combined ANOVA (mean of squares) for the morpho-physiological properties in *Satureja bachtiarica* Bunge

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	تعدادشاخه اصلی Number of Stem	عملکرد ساختار هوایی Shoot yield	پرولین Proline	کل کلروفیل Total Chlorophyll	کل فنل Total Phenol	محتوای نسبی آب R.W.C
سال Year (Y)	1	77.6**	145.8**	1.87ns	43.1**	42.1**	34.1**
تکرار (سال) R (Y)	4	6.2	7.4	1.91	0.98	1.1	1.08
آبیاری Irrigation (A)	2	167.2**	213.9**	33.6**	25.02**	41.1**	39.9**
A×Y	2	156.1**	144.6**	22.4**	34.99**	21.5**	25.1**
خطای کرت‌های اصلی E_a	8	8.04	11.5	0.81	0.99	1.09	0.64
محرک Elicitor (B)	8	155.1**	156.1**	22.11**	32.61**	58.12**	37.1**
A×B	16	217.88**	148.1**	25.8**	41.5**	25.8**	55.3**
B×Y	8	278.1**	168.6**	34.1**	35.1**	33.45**	39.77**
A×B×Y	16	4.99 ns	9.01 ns	1.1 ns	1.14 ns	0.99 ns	0.14 ns
خطای کرت‌های فرعی E_b	96	7.8	10.6	1.55	1.95	1.01	0.22
ضریب تغییرات CV (%)		19.41	18.1	10.5	8.78	9.88	6.77

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال $p\leq 0.05$، $p\leq 0.01$ و عدم معنی‌داری

*, ** significant at $p\leq 0.05$ and $p\leq 0.01$ respectively, ns: non-significant.

جدول ٤– صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه مرزه بختیاری تحت تأثیر اسیدهای آمینه و دور آبیاری

Table 4- The morpho-physiological properties in *Satureja bachtiarica* Bunge. plants affected by elicitors and irrigation periods

دور آبیاری سه روز یک‌بار Irrigation interval 3-day								
سال Year	*تیمارها Treatments		تعداد شاخه اصلی دربوته Number of stem	عملکرد ساختار هوایی Shoot yield	پرولین Proline	کل کلروفیل Total Chlorophyll	کل فنل Total phenol	محتوای نسبی آب R.W.C
				(kg.ha^{-1})	(μg.g^{-1} FW)	(mg.kg^{-1} FW)		(%)
2022	شاهد Control**		10.6±0.8 c**	256.9±10.7 c	8.11±0.3 c	1.18±0.01 c	1.99±0.04 c	42.84±2.2cd
	لیزین Lysine	1	11.71±0.5 c	349.2±10.5 b	7.32±0.4 c	1.41±0.06 ab	2.01±0.02 c	47.85±1.1c
		2	11.02±0.4 c	341.4±11.1 b	8.73±0.3 c	1.21±0.01 c	1.88±0.02 c	45.96±2.4 c
	متیونین	1	11.12±0.7 c	355.5±15.7ab	6.95±0.1 d	1.41±0.05ab	1.95±0.03 c	58.98±2.3a

	Methionine	2	10.88±0.9^{c}	345.2±14.2^{b}	8.44±0.2^{c}	1.33±0.03^{b}	1.88±0.01^{c}	55.09±1.4^{ab}
	فنیل آلانین	1	11.72±0.7^{bc}	355.6±20.7^{ab}	6.96±0.3^{d}	1.38±0.01^{b}	2.08±0.02^{bc}	57.12±2.5^{a}
	Phenylalanine	2	10.82±0.5^{c}	339.5±10.3^{b}	7.76±0.2^{c}	1.31±0.02^{b}	1.98±0.05^{c}	54.92±2.3^{ab}
	پرولین	1	10.82±0.6^{c}	347.1±10.7^{b}	7.99±0.4^{c}	1.29±0.01^{b}	1.88±0.02^{c}	45.7±1.1^{c}
	Proline	2	10.1±0.8^{c}	339.2±10.5^{b}	8.43±0.3^{c}	1.18±0.01^{c}	1.79±0.03^{c}	44.12±1.1^{c}
	LSD		0.78	1.00	1.00	0.75	0.89	0.82
2023	شاهد Control		14.6±0.8^{ab}	312.2±10.9^{b}	7.32±0.2^{c}	1.33±0.01^{b}	2.14±0.07^{bc}	50.84±1.8^{b}
	لیزین	1	16.1±0.7^{a}	377.2±20.5^{ab}	7.01±0.2^{cd}	1.53±0.02^{a}	2.72±0.21^{a}	58.85±2.8^{a}
	Lysine	2	14.02±0.6^{b}	367.4±20.1^{ab}	7.39±0.4^{c}	1.39±0.01^{b}	2.32±0.19^{ab}	55.96±1.7^{ab}
	متیونین	1	15.1±0.55^{a}	412.23±25.5^{a}	6.14±0.2^{d}	1.54±0.03^{a}	2.66±0.09^{a}	62.77±2.6^{a}
	Methionine	2	14.88±0.9^{a}	401.2±17.2^{a}	7.44±0.2^{c}	1.45±0.04^{a}	2.44±0.14^{ab}	55.09±1.8^{ab}
	فنیل آلانین	1	16.09±0.7^{a}	412.21±16.3^{a}	6.15±0.4^{d}	1.51±0.04^{a}	2.41±0.12^{ab}	62.76±2.1^{a}
	Phenylalanine	2	15.82±0.55^{a}	404.5±15.8^{a}	7.11±0.3^{c}	1.44±0.03^{a}	2.31±0.06^{b}	59.92±1.8^{a}
	پرولین	1	14.82±0.6^{a}	389.1±14.9^{a}	7.22±0.4^{c}	1.51±0.01^{a}	2.31±0.03^{b}	58.7±2.4^{a}
	Proline	2	13.1±0.8^{b}	377.2±16.5^{a}	7.98±0.5^{c}	1.35±0.02^{b}	2.22±0.04^{b}	52.12±1.6^{b}
	LSD		0.99	0.77	0.78	0.98	0.77	0.82

دور آبیاری شش روز یک‌بار
Irrigation interval 6-day

سال Year	تیمارها Treatments		تعداد شاخه اصلی در بوته Number of stem	عملکرد ساختار هوایی Shoot yield (kg.ha^{-1})	پرولین Proline (µg.g^{-1} FW)	کل کلروفیل Total chlorophyll (mg.kg^{-1} FW)	کل‌فنل Total phenol (mg.kg^{-1} FW)	محتوای نسبی آب R.W.C (%)
2022	شاهد Control		8.5±0.6^{d}	189.1±10.9^{e}	9.32±0.4^{b}	1.09±0.01^{d}	1.99±0.08^{c}	35.84±1.3^{de}
	لیزین	1	9.5±0.5^{cd}	244.2±10.2^{d}	8.32±0.3^{c}	1.21±0.01^{c}	2.45±0.19^{ab}	42.85±1.4^{cd}
	Lysine	2	8.87±0.6^{d}	233.4±11.7^{d}	9.73±0.5^{b}	1.15±0.03^{c}	2.12±0.09^{bc}	40.96±1.4^{d}
	متیونین	1	9.1±0.5^{d}	251.1±12.1^{c}	8.85±0.5^{bc}	1.29±0.01^{b}	2.34±0.08^{b}	43.98±1.5^{c}
	Methionine	2	8.88±0.4^{d}	237.2±11.2^{d}	9.88±0.3^{b}	1.13±0.03^{cd}	2.22±0.07^{b}	41.09±0.9^{cd}
	فنیل آلانین	1	10.43±0.5^{c}	259.3±14.9^{c}	8.66±0.4^{c}	1.18±0.01^{c}	2.44±0.18^{ab}	39.12±1.5^{d}
	Phenylalanine	2	9.82±0.7^{c}	241.5±14.3^{d}	9.15±0.5^{b}	1.14±0.02^{c}	2.32±0.11^{b}	37.92±1.2^{d}
	پرولین	1	9.82±0.4^{c}	249.1±15.1^{d}	9.81±0.4^{b}	1.23±0.04^{c}	2.11±0.09^{bc}	37.7±1.1^{d}
	Proline	2	8.1±0.5^{d}	231.2±14.5^{d}	10.55±0.5^{b}	1.15±0.01^{c}	2.02±0.08^{c}	36.12±0.9^{d}
	LSD		0.78	0.99	1.00	0.81	0.98	0.75
2023	شاهد Control		13.66±0.6^{b}	251.1±14.7^{c}	8.32±0.3^{c}	1.21±0.01^{c}	2.04±0.06^{c}	41.84±0.9^{cd}
	لیزین	1	15.5±0.4^{a}	350.2±15.5^{ab}	8.27±0.2^{c}	1.31±0.02^{b}	2.55±0.08^{a}	45.85±1.1^{c}
	Lysine	2	14.02±0.3^{b}	332.4±14.1^{b}	9.08±0.5^{b}	1.25±0.03^{c}	2.49±0.06^{ab}	43.96±1.2^{c}
	متیونین	1	15.1±0.5^{a}	349.1±15.7^{b}	8.85±0.4^{bc}	1.35±0.02^{b}	2.61±0.07^{a}	55.98±1.1^{ab}
	Methionine	2	15.88±0.4^{a}	332.2±14.2^{b}	9.27±0.5^{b}	1.31±0.01^{b}	2.49±0.09^{ab}	53.09±1.3^{b}
	فنیل آلانین	1	14.22±0.3^{b}	359.3±15.1^{ab}	8.76±0.4^{c}	1.33±0.02^{b}	2.72±0.09^{a}	54.12±1.2^{b}
	Phenylalanine	2	13.77±0.5^{b}	329.5±14.3^{b}	9.12±0.5^{b}	1.28±0.01^{c}	2.69±0.08^{a}	51.92±1.5^{b}
	پرولین	1	15.11±0.6^{a}	338.1±15.6^{b}	9.76±0.5^{b}	1.34±0.04^{b}	2.66±0.18^{a}	46.7±1.2^{c}
	Proline	2	12.87±0.5^{b}	329.2±14.5^{b}	10.22±0.6^{b}	1.29±0.01^{b}	2.43±0.11^{ab}	43.12±1.1^{c}
	LSD		0.89	1.00	1.00	0.88	0.93	0.69

دور آبیاری نه روز یک‌بار
Irrigation interval 9-day

سال Year	تیمارها Treatments		تعداد شاخه اصلی در بوته Number of stem	عملکرد ساختار هوایی Shoot yield (kg.ha^{-1})	پرولین Proline (µg.g^{-1} FW)	کل کلروفیل Total chlorophyll (mg.kg^{-1} FW)	کل فنل Total phenol (mg.kg^{-1} FW)	محتوای نسبی آب R.W.C (%)
2022	شاهد Control		5.95±0.3^{e}	121.55±9.7^{f}	11.22±0.2^{a}	0.99±0.02^{d}	1.44±0.09^{d}	24.34±0.9^{f}
	لیزین	1	8.5±0.5^{d}	149.2±9.5^{f}	9.66±0.1^{b}	1.17±0.03^{c}	1.77±0.08^{c}	31.85±1.1^{e}
	Lysine	2	7.02±0.3^{e}	138.4±8.1^{f}	10.07±0.4^{b}	1.04±0.01^{d}	1.65±0.02^{cd}	29.96±0.8^{e}
	متیونین	1	7.1±0.4^{e}	151.1±8.1^{ef}	9.85±0.5^{b}	1.22±0.02^{c}	1.81±0.01^{c}	32.98±0.7^{e}

	Methionine	2	6.88 ± 0.5^{e}	148.2 ± 9.2^{f}	10.77 ± 0.2^{b}	1.09 ± 0.01^{d}	1.59 ± 0.01^{d}	30.09 ± 0.6^{e}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	8.43 ± 0.3^{d}	149.3 ± 9.7^{ef}	9.76 ± 0.4^{b}	1.17 ± 0.01^{c}	1.81 ± 0.02^{c}	33.12 ± 0.9^{e}
		2	7.82 ± 0.4^{d}	143.5 ± 8.3^{f}	10.91 ± 0.4^{a}	1.11 ± 0.02^{cd}	1.71 ± 0.01^{c}	31.92 ± 1.1^{e}
	پرولین Proline	1	7.82 ± 0.3^{d}	139.1 ± 9.6^{f}	11.21 ± 0.4^{a}	1.15 ± 0.02^{c}	1.58 ± 0.02^{d}	27.7 ± 0.9^{ef}
		2	6.1 ± 0.2^{e}	137.2 ± 8.5^{f}	11.24 ± 0.5^{a}	1.01 ± 0.01^{d}	1.48 ± 0.01^{d}	24.35 ± 1.1^{f}
	LSD		0.79	0.99	0.78	0.99	1.00	0.98
2023	شاهد Control		6.45 ± 0.2^{e}	181.2 ± 8.9^{e}	10.32 ± 0.2^{b}	1.08 ± 0.02^{d}	1.45 ± 0.01^{d}	24.5 ± 0.7^{f}
	لیزین Lysine	1	9.67 ± 0.3^{cd}	247.2 ± 9.5^{d}	10.41 ± 0.2^{b}	1.24 ± 0.02^{c}	1.91 ± 0.02^{c}	32.85 ± 0.9^{e}
		2	8.02 ± 0.4^{d}	226.4 ± 9.1^{d}	11.19 ± 0.4^{a}	1.11 ± 0.01^{cd}	1.81 ± 0.01^{c}	29.96 ± 1.3^{e}
	متیونین Methionine	1	8.14 ± 0.3^{d}	251.1 ± 9.3^{cd}	10.85 ± 0.5^{b}	1.26 ± 0.01^{c}	1.88 ± 0.01^{c}	34.98 ± 1.4^{de}
		2	8.08 ± 0.3^{d}	233.2 ± 8.2^{d}	11.14 ± 0.2^{a}	1.14 ± 0.02^{c}	1.75 ± 0.01^{c}	30.09 ± 1.1^{e}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	9.63 ± 0.5^{cd}	248.3 ± 7.7^{d}	10.76 ± 0.4^{b}	1.27 ± 0.04^{bc}	1.78 ± 0.02^{c}	35.12 ± 1.2^{de}
		2	8.59 ± 0.5^{d}	238.5 ± 8.3^{d}	11.14 ± 0.4^{a}	1.15 ± 0.01^{c}	1.61 ± 0.01^{c}	31.92 ± 0.9^{e}
	پرولین Proline	1	8.55 ± 0.3^{d}	231.1 ± 7.1^{d}	12.08 ± 0.4^{a}	1.25 ± 0.01^{c}	1.73 ± 0.01^{c}	29.7 ± 1.1^{e}
		2	7.1 ± 0.2^{e}	227.2 ± 8.2^{d}	12.94 ± 0.5^{a}	1.19 ± 0.02^{c}	1.51 ± 0.01^{d}	24.52 ± 0.9^{f}
	LSD		0.88	0.98	0.95	0.91	0.81	0.99

* لیزین ۱: ۲/۵ گرم در لیتر، لیزین ۲: پنج گرم در لیتر، متیونین ۱: ۲/۵ گرم در لیتر، متیونین ۲: پنج گرم در لیتر، فنیل آلانین ۱: ۱۰۰ میکرومولار، فنیل آلانین ۲: ۲۰۰ میکرومولار، پرولین ۱: ۵۰۰ میکرومولار، پرولین ۲: ۱۰۰۰ میکرومولار

**اعداد در هر ستون که دارای حروف مشترک هستند، از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

**Lysine 1: 2.5 g.l^{-1}, Lysine 2: 5 g.l^{-1}, Methionine 1: 2.5 g.l^{-1}, Methionine 2: 5 g.l^{-1}, Phenylalanine 1: 100 µM, Phenylalanine 2: 200 µM, Proline 1: 500 µM, Proline 2: 1000 µM

**Numbers in each column with common letter, have not significant difference.

فتوسنتز از مهم‌ترین واکنش‌های حیاتی در گیاه می‌باشد که نقش تعیین‌کننده در عملکرد و همچنین خصوصیات کمّی و کیفی گیاه دارد. استفاده از ترکیبات محرک رشد، به گیاه کمک می‌کند تا بر عوامل بازدارنده رشدی غلبه کند. این ترکیبات با تحت تأثیر قرار دادن خصوصیات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Pradhan *et al.*, 2017). براساس نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، محلول‌پاشی گیاهان مرزه با اسیدهای آمینه متیونین و فنیل آلانین موجب افزایش عملکرد ساختار هوایی گیاه گردید که همراه با افزایش میزان اسانس بود. به‌طور کلی، اولین واکنش گیاهان در برابر کمبود آب، کاهش رشد رویشی آن‌ها است. رشد سلول، مهم‌ترین فرآیندی است که تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرد. کاهش رشد سلول نیز منجر به کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Fariaszewska *et al.*, 2020). نتایج حاصل از تجزیه واریانس مرکب صفات نشان داد که تنش کم‌آبی بر تمام صفات مورد ارزیابی اثر معنی‌داری داشته است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با کاهش رطوبت یا به عبارتی افزایش فواصل آبیاری، صفات فیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی مرزه بختیاری در تنش شدید (دور آبیاری نه روز یک‌بار) کاهش چشم‌گیری یافتند که نشان‌دهنده کاهش تقسیم و رشد سلولی گیاه در طی کمبود آب می‌باشد. اثر تنش آبی بر توسعه دیواره سلولی در اثر فشار تورژسانس صورت می‌گیرد. بنابراین هر کاهشی در فشار تورژسانس که ناشی از عدم تعادل در وضعیت آب گیاه باشد، منجر به کاهش رشد و حتی در صورت شدید بودن خشکی، موجب توقف رشد می‌شود (Kulak, 2020). با توجه به تحمل نسبی این گیاه به خشکی (Jafari *et al.*, 2021)، بیشترین مقادیر کمیت و کیفیت اسانس به‌ویژه در سال دوم، در دور آبی شش روز یک‌بار به‌دست آمد و پس از آن، کاهش نسبی در مقادیر محرز بود. کاهش کلروفیل در شرایط خشکی تا حدودی به‌علت افزایش تولید رادیکال‌های اکسیژن است که باعث پراکسیداسیون این رنگیزه‌ها و سرانجام تجزیه شیمیایی آن‌ها می‌شود. در شرایط کمبود آب به‌علت صدمات متابولیکی و تغییر سطح متابولیت‌های مربوطه، تثبیت دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، کمبود آب عموماً باعث تخریب و شکسته شدن کلروپلاست‌ها و کاهش میزان کلروفیل شده و مقدار فعالیت آنزیم‌ها را طی فرآیند فتوسنتز کاهش می‌دهد (Shaykh Samani *et al.*, 2023; Danesh Shahraki *et al.*, 2023). کاهش کلروفیل کل در هنگام کمبود آب همچنین ممکن است به‌دلیل تغییر در مجموعه‌های لیپید- پروتئین و کاهش سنتز کمپلکس‌های رنگدانه‌ای و یا تخریب کمپلکس‌های پروتئین- رنگدانه به دام اندازنده نور و یا به‌دلیل تخریب اکسیداتیو لیپیدها و پروتئین‌های کلروپلاست باشد (Esch *et al.*, 2019; Caser *et al.*, 2019). گزارش‌های دیگر نشان داده است که کاهش میزان کلروفیل در اثر تنش خشکی مربوط به افزایش تولید گونه‌های واکنشگر اکسیژن است که موجب پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه کلروفیل می‌شود (Fariaszewska *et al.*, 2020; Jafari *et al.*, 2021). از نتایج حاصل از این پژوهش نیز می‌توان نتیجه گرفت که اسیدهای آمینه‌ای مثل متیونین و فنیل آلانین با افزایش محتوای کلروفیل، روی رشد و فتوسنتز گیاه مرزه بختیاری تأثیر مثبتی دارند که در سایر گیاهان نیز گزارش‌هایی در این خصوص وجود دارد

(Aghaei *et al.*, 2021; Gohari *et al.*, 2021; Heidarzadeh & Modares Sanavi, 2023). به نظر می‌رسد که کاربرد اسید آمینه‌های متیونین و فنیل آلانین از طریق افزایش سطح برگ و فراهم نمودن زمینه مناسب جهت دریافت انرژی و نیز شرکت در ساختار کلروفیل و آنزیم‌های درگیر در متابولیسم کربن فتوسنتزی، موجب افزایش بازده فتوسنتزی می‌شود (Alizadeh *et al.*, 2020; Alavi Samani *et al.*, 2022). نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که تنش کم‌آبی بر میزان کلروفیل و فنل اثر معنی‌دار داشته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش شدت کمبود آب به‌طور معنی‌داری ($P<0/01$) از میزان کلروفیل کل کاسته شد. دلیل دیگر کاهش کلروفیل برگ‌ها، تغییر متابولیسم نیتروژن و استفاده بیشتر از گلوتامات (ماده اولیه سنتز کلروفیل و پرولین) در مسیر تولید پرولین است (Caser *et al.*, 2019). به عبارتی، کاهش مقدار کلروفیل به هنگام تنش کمبود آب می‌تواند به‌دلیل تحریک آنزیم بیوسنتز پرولین یعنی گلوتامیل‌کیناز [1] در پتانسیل آبی پایین باشد. با افزایش تبدیل گلوتامات به پرولین در هنگام تنش خشکی، در واقع گلوتامات که پیش‌ساز کلروفیل نیز می‌باشد، از دسترس خارج شده و سنتز کلروفیل‌ها دچار نقصان می‌شود. به عبارتی، کاهش سنتز کلروفیل می‌تواند به‌علت کاهش تجمع اسید آمینولوولینیک [2] باشد. این اسید پیش‌ساز کلروفیل است که در معرض نور به کلروفیل تبدیل می‌شود و در تنش خشکی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، فعالیت آنزیم گلوتامات‌کیناز که اولین آنزیم مسیر بیوسنتز کلروفیل است، با تنش خشکی بسیار کاهش می‌یابد (Esch *et al.*, 2019).

هرچند که پرولین جزء اسیدهای آمینه غیرضروری طبقه‌بندی می‌شود، امّا مصرف آن در شرایط تنش خشکی، می‌تواند نسبت به استفاده از سایر اسیدهای آمینه و محرک‌های رشدی در آویشن دنایی (*Thymus daenensis* L.) (Kazempour *et al.*, 2023)، همیشه بهار آفریقایی (*Tagetes erecta* L.) (Raoof Haghparvar *et al.*, 2022) و مرزه (*Satureja khuzistanica* Jamzad) (Mohammadi *et al.*, 2021) برتری داشته باشد. این اسید آمینه در شرایط تنش کم‌آبی می‌تواند با کمک به حفظ فشار اسمزی در تحمل تنش آبی به گیاه کمک کرده و باعث جبران بخشی از کاهش رشد و وزن خشک شود. بنابراین مصرف این نوع اسید آمینه در شرایط تنش برای کاهش اثرات ناشی از تنش خشکی قابل توصیه است (Danesh Shahraki *et al.*, 2023). اسیدهای آمینه برای گیاه، پیام‌های شیمیایی ارسال می‌کنند که سبب پاسخ‌های فیزیولوژیکی و ریخت شناختی و تجمع فیتوآلکسین می‌شوند. سیستم دفاعی گیاه طی پاسخ به محرک، فعال شده و در نتیجهٔ بیان ژن‌های دفاعی، متابولیت‌های ثانویه و محتوای اسانس افزایش می‌یابند (Nouri *et al.*, 2015; Pradhan *et al.*, 2017). افزایش تنش خشکی در گیاهان منجر به افزایش اسید آمینه پرولین شده و میزان ذخیره آن در سیتوپلاسم سلولی بیشتر می‌شود. این اسید آمینه در حفاظت سلولی نقش دارد و می‌تواند تا اندازه‌ای موجب ادامه جذب آب از محیط ریشه شود، ولی اتکای گیاه به این ترکیبات آلی برای تنظیم اسمزی هزینه‌بر بوده و گیاه این هزینه را از طریق کاهش عملکرد جبران می‌نماید. پرولین سازوکارهایی مثل تشکیل باندهای هیدروژنی آبی در اطراف پروتئین‌ها را برای حفاظت ساختار آن‌ها و زدودن رادیکال‌های آزاد فعال می‌کند. به‌طور کلی،گیاهان می‌توانند خودشان را تا اندازه‌ای در مقابل تنش خشکی ملایم توسط تجمع اسمولیت‌ها به‌خصوص پرولین محافظت کنند. با کاهش پتانسیل آب، میزان سنتز پرولین از اسید گلوتامیک افزایش می‌یابد (Caser *et al.*, 2019; Esch *et al.*, 2019). تجمع پرولین در زمان تنش، به‌علت تغییر در سرعت اکسیداسیون پرولین به گلوتامات یا عدم دخالت آن در سنتز پروتئین و یا مجموعه این عوامل می‌باشد. از طرف دیگر در گیاهان متحمل به خشکی، میزان اکسیداسیون مولکول‌ها کاهش می‌یابد که یکی از پیامدهای آن افزایش پرولین است (Danesh Shahraki *et al.*, 2023). قندهای محلول و پرولین از جمله املاح رایجی هستند که نقش عمده‌ای در تنظیم اسمزی داشته، به‌طوری‌که غشاءها را از آسیب محافظت کرده و ساختار و فعالیت پروتئین‌ها و آنزیم‌ها را تثبیت می‌کنند (Pradhan *et al.*, 2017). تنظیم اسمزی و سایر پاسخ‌های فیزیولوژیکی به تنش خشکی ممکن است سازگاری کوتاه‌مدت در برابر کمبود آب موقت را فراهم کند. بااین‌حال، این راهکارها ممکن است برای غلبه بر تنش شدید در طول دوره طولانی خشک‌سالی کافی نباشد (Danesh Shahraki *et al.*, 2023). علاوه بر این، سازوکارهای پاسخ احتمالاً هزینه بالایی را برای بهره‌وری گیاهان در پی دارند. در شرایط نامساعد محیطی، عمل ساخت اسیدهای آمینه دشوار یا متوقف می‌شود که مصرف اسیدهای آمینه به‌صورت محلول‌پاشی، نیاز ساخت آن را توسط گیاه برطرف می‌کند و این امکان را به گیاه می‌دهد که انرژی ذخیره‌شده خود را صرف رشد بیشتر و بالا بردن عملکرد و کیفیت محصول نماید. اسیدهای آمینه می‌توانند نقش‌های مختلفی را در گیاهان ایفا کنند. آن‌ها می‌توانند به‌عنوان عوامل کاهش‌دهنده تنش، منبع نیتروژن و پیش‌سازهای هورمونی عمل کنند. اسیدهای آمینه همچنین در بیوسنتز ترکیبات آلی مانند رنگدانه‌ها، ویتامین‌ها، آلکالوئیدها، آنزیم‌ها، ترپنوئیدها، کوآنزیم‌ها، بازهای پورین و پیریمیدین نقش دارند. کاربرد سطوح مختلف اسیدهای آمینه، اثرات مثبتی بر شاخص‌های رشد بومادران (*Achillea*

1- Glutamyl kinase
2- Aminolevulinic acid

millefolium L.) (Shafie *et al.*, 2021)، تعداد گل، وزن تر و خشک گل، کلروفیل کل و کاتالاز و همچنین فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز گیاه بابونه (*Matricaria chamomilla* L) (Darvizheh *et al.*, 2017) تحت تنش خشکی دارد.

فنل‌ها مهم‌ترین ترکیبات ثانویه گیاهان بوده و به سه دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از فنل‌ها و اسیدهای فنلی ساده؛ مشتقات اسید هیدروکسی سینامیک [1] و فلاونوئیدها. فلاونوئیدها بزرگ‌ترین دسته از ترکیبات فنلی هستند که در بدن جانداران، نقش بسیار مهمی در فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی ایفا می‌نمایند (Marinova *et al.*, 2005). از سوی دیگر، اسیدهای فنلی با داشتن ساختار ویژه دارای پتانسیل بالایی برای برهم‌کنش با پروتئین‌های مختلف از جمله آنزیم‌ها می‌باشند. به همین دلیل، آن‌ها می‌توانند باعث ممانعت از فعالیت آنزیم‌هایی مانند ایزوفرم‌های مختلف سیتوکرم P_{450}، سیکلواکسیژناز [2]، الکل دهیدروژناز [3]، لیپواکسیژناز [4] و زانتین‌اکسیداز [5] شوند که در طی فعالیت خود مقادیر بالای رادیکال‌های آزاد تولید می‌کنند و از طرفی، میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش دهند (Tarasevicienе *et al.*, 2021). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اسیدهای آمینه با تحت تأثیر قرار دادن خصوصیات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اسیدهای آمینه با افزایش ظرفیت فتوسنتزی و کربوهیدرات‌ها، مواد اولیه را برای سنتز ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و آنتوسیانین‌ها فراهم می‌آورند (Zandalians *et al.*, 2017). علت افزایش ترکیبات فنلی در تیمار با اسیدهای آمینه مختلف از جمله فنیل آلانین، اثر این ترکیبات بر فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز در تولید ترکیبات فنلی و افزایش مقادیر آنتوسیانین و تانن می‌باشد (Alizadeh *et al.*, 2020). ازآنجاکه این آنزیم یک آنزیم کلیدی در بیوسنتز همه ترکیبات فنلی است، به نظر می‌رسد که در تحقیق حاضر نیز تغییر فعالیت این آنزیم، یکی از دلایل افزایش مقدار ترکیبات فنلی در گیاهان مرزه باشد. سنتز ترکیبات فنلی در بافت‌های گیاهی وابسته به کربوهیدرات‌ها می‌باشد. به نظر می‌رسد که افزایش جذب عناصر غذایی در تیمارهای محلول‌پاشی به‌طور غیرمستقیم با تحت تأثیر قرار دادن متابولیسم کربوهیدرات‌ها، این ترکیبات را به‌سمت سنتز ترکیبات فنلی هدایت می‌کند که نتیجه آن، افزایش مقدار این ترکیبات می‌باشد. تغییر در پاسخ گیاه به غلظت‌های مختلف اسیدهای آمینه می‌تواند در ارتباط با گونه گیاهی، مرحله رشد، روش‌های کاربرد و شرایط محیطی مرتبط باشد (Aminifard et al., 2020; Ashouri et al., 2023). فنیل آلانین، یک اسید آمینه ضروری برای تولید ترکیبات پروتئینی، فنلی و معطر در مسیر بیوسنتزی فنیل پروپانوئیدی محسوب می‌شود که نقش‌های ساختاری مهمی در گیاهان بر عهده دارد (Gohari *et al.*, 2020; Sanikhani *et al.*, 2020; Aghaei *et al.*, 2021).

از نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر، می‌توان استنباط نمود که اسیدهای آمینه به‌کاررفته به‌ویژه فنیل آلانین و پرولین، اثرات مضر حاصل از تنش کمبود آب را کاهش داده و سبب بهبود رشد گیاه در شرایط تنش می‌شوند. کاربرد اسیدهای آمینه روی اجزاء بیوشیمیایی گیاه اثر می‌گذارد که می‌تواند به‌دلیل حفاظت گیاه از مسمومیت آمونیاکی باشد، به این صورت که شکل آمیدی را حذف کرده و به‌عنوان منبع کربن و انرژی برای گیاه به‌کار می‌روند و باعث بیوسنتز ترکیبات ارگانیکی مثل پروتئین، آمین، پورین و ویتامین و آنزیم‌ها و موجب افزایش رشد گیاه و عملکرد می‌شوند (Pradhan *et al.*, 2017). در تحقیق حاضر، اسیدهای آمینه به‌ویژه متیونین و فنیل آلانین به‌علت داشتن ترکیبات تسهیل‌کننده رشدونمو و همچنین عناصر پرمصرف و کم‌مصرف باعث افزایش میزان کلروفیل برگ و فعالیت فتوسنتزی گیاه مرزه بختیاری شده و در نتیجه با افزایش سنتز و ساخت کربوهیدرات‌ها باعث افزایش صفات مورفوفیزیولوژیکی شدند. ضمن آنکه نیتروژن موجود در اسیدهای آمینه موجب افزایش تغذیه نیتروژنی گیاه شده و به رشد گیاه کمک شایانی می‌کند (Poorghadir *et al.*, 2020; Sanikhani *et al.*, 2020). تنش آبی شدید (دور آبی نه روز یک‌بار) در تمام تیمارهای مورد استفاده به‌جز میزان پرولین، نقش کاهش‌دهنده در صفات مورد ارزیابی داشت که با تحقیقات قبلی در این زمینه تطابق دارد (Jafari *et al.*, 2021; Shaykh Samani *et al.*, 2023).

اسانس و ترکیبات اسانس

نتایج نشان داد که اثرگذاری تیمارهای آزمایشی در هر دو سال بر میزان ترکیبات غالب اسانس و محتوای اسانس معنی‌دار بود (جدول ۵). نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه فیتوشیمیایی اسانس، وجود ۱۱ ترکیب در اسانس این گیاه را نشان داد. بیشترین اجزاء موجود در اسانس شامل کارواکرول [6]، پی-سایمن [7]، گاما و آلفا-ترپینن [8]، جرماکرن-دی [9] و تیمول [10] بود. در بین اجزاء اسانس، ماده مؤثره کارواکرول بیشترین

1- Hydroxycinnamic acid
2- Cyclooxygenase
3- Alcohol dehydrogenase
4- Lipoxygenase
5- Xanthine oxidase

6- Carvacrol
7- P-cymene
8- Gamma-terpinene and alpha-terpinene
9- Germacren-D
10- Thymol

میزان را در تمامی گیاهان تحت تیمار در هر دو سال تحقیق، به خود اختصاص داد (جدول ۶). بیشترین مقادیر اسانس (۱/۰۹ – ۱/۶۱ درصد) در دو سال تحقیق در هر دو سال انجام تحقیق در تیمارهای متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) در دور آبیاری سه روز یک‌بار به‌دست آمد. در هر دوسال انجام تحقیق، بالاترین مقادیر مواد مؤثره پی-سایمن (۱۷/۱۲-۱۹/۴۵ درصد)، گاما-ترپینن (۱۸/۱۴-۱۶/۸۷ درصد) و کارواکرول (۴۵/۱۲-۵۱/۲۴ درصد) در دورهای آبیاری سه و شش روز یک‌بار و تحت تیمارهای متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) به‌دست آمد. از سوی دیگر، کمترین مقادیر اسانس (۰/۵۹-۰/۸۴ درصد) و مواد مؤثره پی-سایمن (۱۰/۱۱-۱۱/۹ درصد)، گاما-ترپینن (۵/۴۵-۶/۷۵ درصد) و کارواکرول (۲۹/۲۳-۳۳/۰۱ درصد) در دور آبیاری نه روز یک‌بار و تحت تیمارهای شاهد و نیز محلول‌پاشی پرولین (۱۰۰۰ میکرومولار) به‌دست آمد (جدول ۶). به‌طور کلی، نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که گیاهان در سال دوم رشد خود توانستند تحت دور آبیاری شش روز یک‌بار، در گروه آماری با گیاهان تحت تیمارهای برتر دور آبیاری سه روز یک‌بار از جمله متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) قرار گیرند و این نتیجه در مورد ترکیبات مؤثره پی-سایمن و کارواکرول بیشتر مشهود بود (جدول ۶). براساس نتایج مشخص شد که اثرگذاری تیمارهای آزمایشی بر مونوترپن‌های حلقوی (آلفا-ترپینن، گاما-ترپینن، جرماکرن-دی، کارواکرول، تیمول و پی-سایمن) و نیز میزان اسانس، معنی‌دار و در گروه‌های مختلفی قرار گرفتند (جدول ۶). در اکثر موارد، میزان ترکیبات اسانس در سطوح تیماری پرولین، در کمترین مقادیر قرار گرفتند. در غالب موارد، تیمارهای متیونین و فنیل آلانین بیشترین اثر را بر میزان ماده مؤثره کارواکرول و سایر ترکیبات غالب اسانس تمامی گیاهان در هر دو سال ایجاد نمودند. در تولید مواد مؤثره پی-سایمن و کارواکرول در سال دوم پژوهش در دور آبیاری نه روز یک‌بار، کاربرد تیمار پرولین دارای اثر کاهنده و یا مانند شاهد بود و تیمارهایی از جمله متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) منجر به افزایش این مواد مؤثره شدند (جدول ۶).

جدول ۵- تجزیه مرکب (میانگین مربعات) اسانس و ترکیبات غالب اسانس گیاه مرزه بختیاری

Table 5- Combined ANOVA (mean of squares) for the content and main composition of essential oil of *Satureja bachtiarica* Bunge

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	تیمول Thymol	ژرماکرن‌دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-terpinene	کارواکرول Carvacrol	گاما-ترپینن Gamma-terpinene	پی-سایمن P-cymene	اسانس Essential oil
سال Year (Y)	1	14.1**	10.99**	32.1**	0.98 ns	34.1**	17.71**	14.88**
تکرار (سال) R(Y)	4	0.15	0.56	0.78	0.88	1.01	0.71	0.81
آبیاری Irrigation (A)	2	12.61**	42.6**	25.9**	27.5**	18.1**	35.1**	25.8**
A×Y	2	14.99**	21.89**	45.51**	24.4**	40.11**	14.1**	29.1**
خطای کرت‌های اصلی E_a	8	0.43	0.67	0.76	1.01	0.78	0.82	0.33
محرک Elicitor (B)	8	10.88**	30.1**	51.1**	38.1**	27.1**	36.07**	35.1**
A×B	16	11.69**	36.8**	45.1**	45.4**	35.3**	25.8**	41.8**
B×Y	8	14.89**	30.91**	42.8**	14.45**	27.6**	35.14**	26.14**
A×B×Y	16	0.45 ns	0.51 ns	0.35 ns	0.61 ns	0.43 ns	0.19 ns	0.77 ns
خطای کرت‌های فرعی E_b	96	0.32	0.78	0.91	0.88	0.48	0.33	0.99
ضریب تغییرات CV (%)		11.8	10.6	5.12	7.92	8.05	7.12	6.55

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال $p≤۰/۰۵$، $p≤۰/۰۱$ و عدم معنی‌داری

*, ** significant at $p\leq0.05$ and $p\leq0.01$ respectively, ns: non-significant.

جدول ٦- اسانس و ترکیبات غالب اسانس (درصد) تحت تأثیر اسیدهای آمینه و دور آبیاری

Table 6- The content and main composition of essential oil (%) in *Satureja bachtiarica* Bunge. affected by amino acids and irrigation periods.

دور آبیاری سه روز یک‌بار
Irrigation interval 3-day

سال Year	* تیمارها Treatments		تیمول Thymol	جرماکرن-دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-terpinene	کارواکرول Carvacrol	گاما-ترپینن Gamma-terpinene	پی-سایمن P-cymene	اسانس Essential oil
2022	شاهد Control**		0.89±0.05^{c}	0.99±0.09^{d}	1.49±0.1^{c}	34.99±1.2^{d}	14.6±1.1^{b}	14.91±1.1^{c}	0.88±0.04^{d}
	لیزین Lysine	1	1.28±0.08^{b}	1.61±0.08^{b}	2.1±0.1^{a}	41.15±1.1^{c}	17.8±1.2^{a}	16.69±0.95^{b}	0.98±0.06^{d}
		2	1.22±0.09^{b}	1.22±0.07^{c}	1.67±0.09^{b}	38.55±0.9^{c}	16.2±0.9^{ab}	15.12±0.98^{c}	0.93±0.03^{d}
	متیونین Methionine	1	1.01±0.09^{c}	1.59±0.08^{c}	1.76±0.12^{b}	45.12±0.8^{b}	17.9±1.1^{a}	16.99±1.1^{b}	1.09±0.02^{c}
		2	1.22±0.08^{b}	1.57±0.09^{c}	1.23±0.09^{c}	39.58±0.9^{c}	18.01±0.8^{a}	16.8±0.94^{b}	0.99±0.05^{cd}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	1.08±0.09^{c}	1.48±0.07^{c}	1.55±0.08^{b}	45.11±0.9^{b}	18.1±1.1^{a}	17.12±0.94^{b}	1.08±0.03^{c}
		2	1.01±0.09^{c}	1.33±0.09^{c}	1.18±0.09^{c}	38.22±0.8^{c}	18.01±0.9^{a}	16.69±0.98^{b}	0.97±0.04^{d}
	پرولین Proline	1	1.27±0.08^{b}	1.6±0.08^{b}	1.58±0.08^{b}	41.21±1.2^{c}	16.7±0.9^{ab}	14.93±1.1^{c}	0.99±0.05^{cd}
		2	0.99±0.08^{c}	1.55±0.06^{bc}	1.34±0.09^{c}	39.72±1.1^{c}	15.54±0.9^{b}	14.55±0.99^{c}	0.91±0.04^{d}
	LSD		0.95	1.00	0.88	0.95	0.66	0.87	1.00
2023	شاهد Control		0.99±0.06^{c}	1.45±0.04^{c}	1.55±0.09^{b}	40.55±1.2^{c}	13.66±0.9^{c}	16.9±1.2^{b}	1.35±0.06^{b}
	لیزین Lysine	1	1.44±0.07^{a}	1.76±0.03^{b}	1.99±0.09^{a}	47.42±1.1^{a}	15.8±0.8^{b}	19.55±1.12^{a}	1.55±0.05^{a}
		2	1.22±0.08^{b}	1.65±0.05^{b}	1.77±0.1^{b}	44.33±1.2^{b}	14.55±0.9^{b}	18.87±1.2^{a}	1.43±0.07^{a}
	متیونین Methionine	1	1.44±0.09^{a}	1.76±0.04^{b}	2.01±0.09^{a}	48.61±0.9^{a}	16±0.8^{ab}	19.11±1.3^{a}	1.6±0.08^{a}
		2	1.34±0.07^{a}	1.57±0.03^{c}	1.77±0.08^{b}	45.51±0.9^{b}	15.77±0.8^{b}	19.01±1.1^{a}	1.49±0.05^{ab}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	1.33±0.08^{a}	1.76±0.05^{b}	1.67±0.1^{b}	44.33±0.9^{b}	16.8±0.7^{a}	18.67±1.2^{a}	1.61±0.05^{a}
		2	1.01±0.07^{c}	1.81±0.03^{b}	1.81±0.08^{a}	41.77±0.9^{c}	15.1±0.9^{b}	18.15±1.1^{a}	1.47±0.06^{ab}
	پرولین Proline	1	1.41±0.08^{a}	1.99±0.04^{a}	1.81±0.09^{a}	43.43±1.1^{b}	14.6±0.7^{b}	17.99±1.2^{ab}	1.55±0.07^{a}
		2	1.32±0.09^{a}	1.45±0.03^{c}	1.43±0.09^{c}	41.91±0.9^{bc}	13.2±0.7^{c}	17.33±0.99^{b}	1.43±0.05^{ab}
	LSD		0.94	0.81	1.00	0.98	0.99	1.00	0.79

دور آبیاری شش روز یک‌بار
Irrigation interval 6-day

			تیمول Thymol	جرماکرن-دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-terpinene	کارواکرول Carvacrol	گاما-ترپینن Gamma-terpinene	پی-سایمن P-cymene	اسانس Essential oil
2022	شاهد Control		0.76±0.07^{d}	0.81±0.01^{f}	1.01±0.09^{c}	35.11±0.9^{d}	10.66±0.6^{d}	13.9±0.88^{d}	0.71±0.02^{e}
	لیزین Lysine	1	0.99±0.08^{c}	1.11±0.03^{d}	1.51±0.08^{b}	38.24±0.9^{c}	13.9±0.8^{c}	16.69±0.91^{b}	0.88±0.02^{d}
		2	1.01±0.09^{c}	1.01±0.02^{d}	1.34±0.09^{c}	36.31±0.8^{d}	12.1±0.9^{c}	15.12±0.93^{c}	0.81±0.01^{d}
	متیونین Methionine	1	1.03±0.08^{c}	1.22±0.01^{c}	1.49±0.08^{bc}	40.43±0.9^{c}	14.7±0.6^{b}	17.11±0.95^{b}	0.89±0.05^{d}
		2	0.98±0.08^{c}	1.01±0.02^{d}	1.24±0.07^{c}	37.51±0.8^{c}	14.65±0.8^{b}	16.8±0.87^{b}	0.79±0.05^{de}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	0.99±0.09^{c}	0.99±0.01^{d}	1.44±0.06^{c}	39.44±0.9^{c}	14.8±0.8^{b}	16.5±1.1^{b}	0.88±0.02^{d}
		2	1.01±0.08^{c}	0.89±0.03^{e}	1.18±0.07^{c}	35.23±0.7^{d}	13.8±0.9^{c}	16.69±0.98^{b}	0.87±0.05^{d}
	پرولین Proline	1	0.98±0.09^{c}	0.91±0.02^{d}	1.41±0.08^{c}	39.91±0.7^{c}	14.1±0.6^{b}	15.94±0.8^{c}	0.79±0.03^{de}
		2	0.89±0.07^{cd}	0.86±0.02^{e}	1.24±0.09^{c}	34.81±0.7^{d}	12.32±0.5^{c}	15.9±0.5^{c}	0.75±0.02^{e}
	LSD		1.00	0.87	1.00	0.99	1.00	0.78	0.98
2023	شاهد Control		1.01±0.08^{c}	1.65±0.04^{b}	1.01±0.09^{c}	41.11±0.9^{c}	10.11±0.6^{d}	17.99±1.01^{b}	1.02±0.04^{c}
	لیزین Lysine	1	1.51±0.09^{a}	2.12±0.07^{a}	2.29±0.18^{a}	50.21±1.1^{a}	12.8±0.8^{c}	18.69±0.95^{a}	1.36±0.05^{b}
		2	1.33±0.07^{a}	1.99±0.08^{a}	1.99±0.11^{a}	49.33±1.1^{a}	11.1±0.6^{c}	18.12±0.88^{a}	1.25±0.04^{b}
	متیونین Methionine	1	1.45±0.09^{a}	1.97±0.09^{a}	1.44±0.09^{c}	51.24±0.8^{a}	13.5±0.6^{c}	19.45±1.1^{a}	1.33±0.05^{b}
		2	1.26±0.08^{b}	1.57±0.03^{c}	1.46±0.08^{c}	50.66±0.9^{a}	12.8±0.7^{c}	18.91±0.95^{a}	1.27±0.04^{b}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	1.41±0.11^{a}	1.76±0.05^{b}	1.46±0.09^{c}	51.23±0.9^{a}	12.9±0.8^{c}	19.01±0.97^{a}	1.31±0.05^{b}
		2	1.32±0.08^{a}	1.33±0.03^{c}	1.39±0.08^{c}	45.41±1.1^{b}	12.21±0.5^{c}	18.77±0.98^{a}	1.21±0.03^{b}

			تیمول Thymol	جرماکرن-دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-terpinene	کارواکرول Carvacrol	گاما-ترپینن Gamma-terpinene	پی-سایمن P-cymene	اسانس Essential oil
	پرولین Proline	1	1.51±0.08^{a}	2.11±0.07^{a}	1.41±0.09^{c}	43.21±0.8^{b}	11.66±0.6^{c}	18.99±0.99^{a}	1.26±0.05^{b}
		2	1.33±0.09^{ab}	1.99±0.05^{a}	1.27±0.07^{c}	42.55±0.9^{b}	10.91±0.6^{d}	18.55±0.89^{a}	1.14±0.04^{c}
	LSD		1.00	0.87	1.00	1.00	0.67	0.77	1.00
دور آبیاری نه روز یک‌بار **Irrigation interval 9-day**									
			تیمول Thymol	**جرماکرن-دی Germacren-D**	**آلفا-ترپینن Alpha-terpinene**	**کارواکرول Carvacrol**	**گاما-ترپینن Gamma-terpinene**	**پی-سایمن P-cymene**	**اسانس Essential oil**
2022	شاهد Control		0.46±0.05^{e}	0.39±0.05^{f}	0.45±0.01^{e}	29.23±0.4^{e}	5.45±0.33^{f}	10.11±0.55^{e}	0.59±0.01^{f}
	لیزین Lysine	1	0.77±0.06^{d}	0.76±0.06^{e}	1.01±0.06^{c}	33.14±0.5^{d}	9.11±0.25^{d}	12.13±0.91^{d}	0.71±0.02^{e}
		2	0.67±0.07^{d}	0.71±0.06^{e}	0.88±0.06^{d}	31.18±0.3^{e}	8.02±0.45^{e}	11.55±0.9^{e}	0.69±0.01^{e}
	متیونین Methionine	1	0.75±0.07^{d}	0.89±0.05^{e}	1.12±0.08^{c}	32.22±0.4^{e}	10.11±0.6^{d}	12.11±0.77^{d}	0.73±0.02^{e}
		2	0.65±0.06^{de}	0.57±0.06^{f}	1.09±0.07^{c}	30.34±0.5^{e}	9.77±0.53^{d}	12.08±0.94^{d}	0.69±0.01^{e}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	0.71±0.08^{d}	0.84±0.05^{e}	1.16±0.05^{c}	32.55±0.4^{e}	10.1±0.61^{d}	11.5±0.76^{e}	0.72±0.02^{e}
		2	0.69±0.07^{d}	0.77±0.06^{e}	1.08±0.04^{c}	29.99±0.6^{e}	9.96±0.76^{d}	11.22±0.98^{e}	0.67±0.03^{e}
	پرولین Proline	1	0.69±0.06^{d}	0.99±0.05^{d}	1.14±0.05^{c}	30.85±0.4^{e}	9.15±0.66^{d}	11.12±0.76^{e}	0.68±0.02^{e}
		2	0.65±0.07^{de}	0.81±0.04^{e}	1.09±0.06^{c}	30.22±0.3^{e}	8.11±0.42^{e}	10.98±0.88^{e}	0.61±0.01^{ef}
	LSD		0.75	0.81	0.79	0.93	0.75	1.00	0.88
2023	شاهد Control		0.65±0.03^{e}	0.71±0.04^{e}	0.87±0.07^{d}	33.01±0.7^{de}	6.75±0.33^{f}	12.99±0.77^{d}	0.84±0.03^{d}
	لیزین Lysine	1	0.91±0.08^{c}	0.99±0.05^{d}	1.22±0.08^{c}	36.22±0.6^{d}	8.82±0.44^{e}	14.69±0.95^{c}	0.98±0.05^{d}
		2	0.87±0.08^{cd}	0.89±0.05^{ed}	1.01±0.09^{c}	34.55±0.4^{d}	7.02±0.55^{e}	13.12±0.9^{d}	0.93±0.03^{d}
	متیونین Methionine	1	0.99±0.08^{c}	0.95±0.06^{d}	1.23±0.08^{c}	38.41±0.7^{c}	8.55±0.48^{e}	14.11±0.86^{c}	1.01±0.04^{c}
		2	0.88±0.05^{cd}	0.86±0.05^{e}	1.11±0.08^{c}	35.31±0.6^{d}	7.77±0.41^{e}	14.8±0.95^{c}	0.99±0.03^{cd}
	فنیل آلانین Phenylalanine	1	0.91±0.04^{c}	0.91±0.04^{d}	1.25±0.07^{c}	37.28±0.7^{c}	9.45±0.54^{d}	15.5±0.89^{c}	1.02±0.02^{c}
		2	0.88±0.07^{cd}	0.88±0.05^{e}	1.18±0.09^{c}	36.55±0.8^{d}	8.96±0.61^{e}	15.69±0.98^{c}	0.97±0.04^{d}
	پرولین Proline	1	1.01±0.06^{c}	0.99±0.07^{d}	1.31±0.07^{c}	37.32±0.6^{c}	7.66±0.52^{e}	12.9±0.91^{d}	0.95±0.03^{d}
		2	0.98±0.05^{c}	0.81±0.02^{e}	1.28±0.08^{c}	33.02±0.5^{d}	7.01±0.4^{ef}	11.9±0.94^{e}	0.85±0.02^{d}
	LSD		0.93	1.00	0.99	1.00	0.82	1.00	0.88

* لیزین ۱: ۲/۵ گرم در لیتر، لیزین ۲: پنج گرم در لیتر، متیونین۱: ۲/۵ گرم در لیتر، متیونین ۲: پنج گرم در لیتر، فنیل آلانین ۱: ۱۰۰ میکرومولار، فنیل آلانین ۲: ۲۰۰ میکرومولار، پرولین ۱: ۵۰۰ میکرومولار، پرولین ۲: ۱۰۰۰ میکرومولار

** اعدادی در هر ستون که دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.

* Lysine 1: 2.5 $g.l^{-1}$, Lysine 2: 5 $g.l^{-1}$, Methionine 1: 2.5 $g.l^{-1}$, Methionine 2: 5 $g.l^{-1}$, Phenylalanine 1: 100 µM, Phenylalanine 2: 200 µM, Proline 1: 500 µM, Proline 2: 1000 µM

**Numbers in each column with common letters, have notsignificant difference.

یکی از دلایل بیشتر شدن مقدار اسانس را می‌توان به‌دلیل افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه و تأثیر افزایش جذب عناصر غذایی در ساختمان و کارکرد کلروپلاست دانست که این افزایش ممکن است به تولید بیشتر غده‌های ترشح‌کننده اسانس در برگ منجر شود. ازآنجایی‌که غده‌های ترشح‌کننده اسانس گیاه مرزه بختیاری در برگ‌ها قرار دارند، هر عاملی که سبب افزایش سطح و وزن برگ‌ها شود، مقدار اسانس را نیز افزایش خواهد داد. ازاین‌رو به‌نظر می‌رسد که افزایش تولید کلروفیل، سبب افزایش بافت‌های فتوسنتزی، افزایش رشد برگ‌ها و در نهایت منجر به افزایش عملکرد اسانس خواهد شد (Danesh Shahrani *et al.*, 2023; Pradhan *et al.*, 2017). کاهش سطح برگ در اثر تنش خشکی ملایم، در برخی موارد موجب بالا رفتن تراکم غده‌های تولیدکننده اسانس در برگ‌ها شده و مقدار تجمع اسانس را افزایش می‌دهد (Shaykh Samani *et al.*, 2023).

در پژوهش حاضر مشاهده گردید که محلول‌پاشی پرولین می‌تواند تا غلظت ۵۰۰ میکرومولار، نقش افزاینده در برخی از مواد مؤثره اسانس گیاهان تحت تیمار از جمله تیمول و جرماکرن-دی داشته باشد. اسیدهای آمینه در گیاهان با ممانعت از ساخت آنزیم‌های ضروری برای تولید اتیلن در کمک به ساخت کلروفیل نقش اساسی ایفا می‌کنند. همچنین، علت جلوگیری از تخریب کلروفیل توسط اسیدهای آمینه ممکن است به‌دلیل مهار فعالیت آنزیم پراکسیداز باشد که اثر خود را از طریق کاهش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک، بر غشاء تیلاکوئید کلروپلاست می‌گذارند و از تخریب کلروفیل توسط اکسیژن فعال جلوگیری می‌کنند. به نظر می‌رسد که نقش اسیدهای آمینه در افزایش کمّی و کیفی گیاهان به‌علت اثر آنتی‌اکسیدانی،

کمک به تعادل یونی و افزایش دسترسی به نیتروژن می‌باشد (Ghanbarzadeh *et al.*, 2019; Shafie *et al.*, 2021). ترکیبات اسانس با محلول‌پاشی اسیدهای آمینه به‌دلیل راه‌اندازی چرخه سنتز اسید آمینه و آنزیم‌های پروتئینی در افزایش ترکیبات اسانس مؤثرند. به‌طور کلی، هر افزایشی در کل کربوهیدرات‌های گیاه موجب افزایش سنتز اسانس در بافت مسئول ساخت این ترکیبات می‌شود (Kulak, 2020; Caser *et al.*, 2019). بیوسنتز ترپنوئیدها با اتصال سر به دم ایزوپنتیل دی‌فسفات به ایزومر دی‌متیل آلیل دی‌فسفات ادامه می‌یابد که با این اتصال، ژرانیل دی‌فسفات حاصل می‌شود. ازآنجایی‌که ترکیبات غالب اسانس‌ها از گروه ترپن‌ها می‌باشد و به‌دلیل اینکه گلوکز به‌عنوان پیش‌ماده ضروری در سنتز اسانس و به‌ویژه مونوترپن‌ها است، بنابراین فتوسنتز و تولید فرآورده‌های فتوسنتزی ارتباط مستقیمی با تولید اسانس دارد (Frahani *et al.*, 2020). تشکیل مونوترپن‌های الکلی با مونوترپن گاماترپینن شروع شده و در ادامه از طریق پی‌سایمن آروماتیک، واکنش‌ها به‌سمت سنتز آن‌ها پیش می‌رود. گاماترپینن که به‌وسیله آنزیم گاماترپینن‌سنتاز کاتالیز می‌شود، پیش‌ماده مونوترپن‌های آروماتیک، در ادامه مسیر بوده و بنابراین نقش اساسی را در این مسیر ایفا می‌نماید (Boohlman & Keeling, 2008). بنابراین به نظر می‌رسد که تیمارهای به‌کاررفته در این پژوهش، میزان کلروفیل کل و در نتیجه بازده فتوسنتزی در مرزه بختیاری را افزایش داده و از این طریق بر ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس نیز تأثیرگذار بوده‌اند. با توجه به اینکه بیوسنتز ترپنوئیدها در تریکوم‌ها، توسط ژن‌ها کنترل می‌شوند، اثر اصلی اسیدهای آمینه بر تولید اسانس به تأثیر آن‌ها بر ژن‌ها و آنزیم‌های درگیر در متابولیسم ثانویه گیاه مربوط می‌شود (Ashouri *et al.*, 2023). به‌طور کلی، اسیدهای آمینه مختلف از جمله متیونین و فنیل آلانین نقش مهمی در فعال کردن آنزیم‌های مسیر متابولیسم ثانویه گیاهان می‌کنند. کاربرد متیونین و فنیل آلانین احتمالاً به‌دلیل افزایش جذب دی اکسید کربن، کاهش تعرق، تنظیم ژن و القاء آنزیم‌های مرتبط با بیوسنتز ترپنوئیدها، محتوای اسانس را تغییر می‌دهد (Hawrylak-Nowak *et al.*, 2021). گونه‌های گیاهی مختلف، سازوکارهای متفاوتی جهت تحمل شرایط تنشی دارند. تنش کم‌آبی با کاهش بخش رویشی یا همان قسمت تعرق‌کننده گیاه و سوق دادن محصولات فتوسنتزی به‌سمت تولید متابولیت‌های ثانویه در راستای تحمل بیشتر گیاه به شرایط تنشی ایجادشده، موجب افزایش محتوای این ترکیبات در گیاه می‌گردد، ولی چنانچه شدت تنش از آستانه تحمل گیاه بالاتر رود، فتوسنتز گیاه مختل شده و به دنبال آن تولید کربوهیدرات‌ها و در نهایت سنتز متابولیت‌های ثانویه از جمله اسانس کاهش پیدا می‌کند (Boohlman & Keeling, 2008). تغییرات مشاهده‌شده در کیفیت اسانس گیاهان تیمارشده را می‌توان به تفاوت در اثرات هر یک از اسیدهای آمینه بر رشد گیاه، پاسخ گیاه به عوامل زیستی و غیرزیستی که منجر به افزایش مواد مؤثره گیاه می‌شود، نسبت داد (Hawrylak Nowak *et al.*, 2021). مقادیر مواد مؤثره گیاهان دارویی تحت تنش خشکی، رفتار مختلفی دارند. به‌طوری‌که تحت تنش خشکی و زمان گل‌دهی، میزان ماده مؤثره آلفا-پینن [1] در گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) کاهش، ولی در اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia* L.) افزایش یافت. همچنین ترکیبات مؤثره آلفا-پینن، لیمونن [2] و اوکالیپتول [3] در مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) کاهش یافت، درحالی‌که این ترکیبات در ریحان (*Ocimum basilicum* L.) افزایش یافتند (Kulak, 2020). در گیاهان دارویی قدومه (*Alyssum desertorum*)، آویشن (*Thymus vulgaris*)، همیشه بهار (*Calendula officinalis*) و گاوزبان (*Borago officinalis*) (Yadegari, 2017) و گونه‌های مرزه (*Satureja*) (Yadegari, 2022)، تنش آبی منجر به کاهش درصد اسانس و نیز برخی از مواد مؤثره اسانس می‌گردد. به‌طور کلی، متابولیت‌های ثانویه به گیاهان دارویی و معطر کمک می‌کنند تا گیاه به شرایط و تنش‌های محیطی مانند خشکی سازگاری بیشتری پیدا کند. به‌علاوه، تأثیرات ناشی از تنش در افزایش اسانس عمدتاً به‌علت اثر آن بر رشدونمو گیاه است. گیاهان غلظت بالایی از متابولیت‌ها را تحت شرایط کمبود آب تولید می‌کنند و مقدار کمتری از کربن را به رشد تخصیص می‌دهند که نشان از یک تعادل بین دفاع و رشد می‌باشد. تنش خشکی با تحریک سنتز متابولیت‌های ثانویه از طریق مسیرهای متابولیکی در گیاهان دارویی و معطر که برخی از آن‌ها ناشناخته هستند، سبب تغییرات میزان کمّی و کیفی متابولیت‌های ثانویه می‌شود. بهبود در عملکرد اسانس با استفاده از متیونین و فنیل آلانین ممکن است به‌دلیل افزایش در رشد، جذب مواد غذایی و یا تغییر در تعداد غده‌های ترشحی برگ و یا بیوسنتز مونوترپن‌ها باشد (Hawrylak Nowak *et al.*, 2021; Taraseviciene *et al.*, 2020). تنش خشکی با اختلال در فتوسنتز و تنفس، درصد و ترکیب شیمیایی اسانس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تنش خشکی در حد ملایم و متوسط توانسته است که میزان برخی ترکیبات مؤثره و مهم نظیر تیمول یک ترکیب فنلی را در گیاهان دارویی آویشن دنایی (*Thymus daenensis*)، آویشن باغی (*Thymus vulgaris*) (Askary *et al.*, 2018) و مرزه سهندی (*Satureja sahandica* Bornm.) (Zakerian *et al.*, 2020) افزایش دهد. تغییرات بیوسنتز

1- Alpha-pinene
2- Limonene
3- Eucalyptol

ترکیبات ترپنوئیدی از جمله مونوترپن‌ها و سزکوئی‌ترپن‌ها ممکن است به‌علت تغییرات بیوانرژیتیک سلول‌های گیاهی در پاسخ به عناصر مغذی باشد و به نظر می‌رسد که یکی از دلایل اختلاف در مقدار و نوع برخی از ترکیبات اسانس گیاه مورد آزمایش، مربوط به اختلاف جایگاه‌های بیوسنتزی ترکیبات از نظر بهره‌گیری از منابع انرژی باشد (Sasani *et al.*, 2021). بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه تحت تأثیر رشدونمو گیاه است که به رفتارهای فیزیولوژیکی گیاه به‌ویژه ظرفیت فتوسنتز بستگی دارد. تغییر در فعالیت فتوسنتز باعث تغییر در فعالیت متابولیکی گیاه می‌شود (Poorghadir *et al.*, 2020). در گیاهان معطر، بیوسنتز و تجمع اسانس‌ها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با ظرفیت فتوسنتز گیاه مرتبط است، به‌طوری‌که تغییرات مشاهده‌شده در کیفیت اسانس گیاهان تیمارشده را می‌توان به تفاوت در اثرات هر یک از اسیدهای آمینه بر رشد گیاه، پاسخ گیاه به عوامل زیستی و غیرزیستی که منجر به افزایش مواد مؤثره گیاه می‌شود، نسبت داد (Hawrylak Nowak *et al.*, 2021).

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مشاهده گردید که در غالب موارد تنش خشکی شدید (دور آبیاری نه روز یک‌بار) منجر به کاهش میزان کلروفیل کل و به تبع آن کاهش اسانس شد. از طرف دیگر، اسانس گیاه مرزه بختیاری با استفاده از اسیدهای آمینه مختلف به‌ویژه متیونین و فنیل آلانین تحت شرایط عدم تنش رطوبتی (دور آبیاری سه روز یک‌بار) نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشت. علاوه‌بر میزان اسانس، درصد ترکیبات مؤثره غالب اسانس از جمله پی–سایمن، کارواکرول و گاما–ترپینن نیز تحت تأثیر تنش رطوبتی و نیز تیمارهای مختلف قرار گرفتند. بالاترین میزان اسانس در تیمار دوره آبیاری سه روز یک‌بار و به‌کارگیری متیونین (۲/۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱۰۰ میکرومولار) مشاهده شد. تحت شرایط تنش رطوبتی، محلول‌پاشی متیونین به‌عنوان یک روش مفید می‌تواند برای کاهش اثرات تنش و به دنبال آن، افزایش عملکرد اسانس گیاه مرزه بختیاری مفید واقع شود. با توجه به قیمت پایین متیونین از یک سو و از سوی دیگر، قیمت بالای اسانس مرزه بختیاری و استفاده‌های متعدد این گیاه ارزشمند در صنایع مختلف غذایی و دارویی، محلول‌پاشی متیونین به‌عنوان یک روش مفید و اقتصادی می‌تواند برای کاهش اثرات تنش و به دنبال آن، افزایش عملکرد اسانس گیاه مرزه بختیاری در اقلیم‌ها و شرایط خاک مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

References

1. Adams, R.P. (2007). *Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/ Quadrupole Mass Spectroscopy*. Allured Publishing Corporation, Carol Stream, IL.
2. Aghaei, K., Ghasemi Pirbalouti, A., Mousavi, A., Naghdi Badi, H.A., & Mehnatkesh AM. (2021). Effects of different fertilizers and the foliar application of L-phenylalanine on mineral contents of hyssop [*Hyssopus officinalis* L. subsp. *angustifolius* (Bieb.)]. *Journal of Horticultural Plants Nutrition, 4*(2), 13-28. (In Persian). https://doi.org/10.22070/hpn.2021.4639.1038
3. Ajdanian, L., Babaee, M., & Aroee, H., (2019). *Foliar application of amino acids on yield and growth of two cultivar of Ocimum.* 11th Iranian Horticultural Sciences Conference. 26-29 Aug. Urmia University.1-7. (In Persian).
4. Alavi Samany, S.M., Ghasemi Pirbalouti, A., & Malekpoor, F., (2022). Phytochemical and morpho-physiological changes of hyssop in response to chitosan-spraying under different levels of irrigation. *Industrial Crops and Products*, *176*, 114330. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114330
5. Albergaria, E.T., Oliveira, A.F., & Albuquerque, U.P., (2020). The effect of water deficit stress on the composition of phenolic compounds in medicinal plants. *South African Journal of Botany*, *131*, 12-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.002
6. Alizadeh, A., Moghaddam, M., Asgharzade, A., & Mahmoodi Sourestani, M., (2020). Phytochemical and physiological response of *Satureja hortensis* L. to different irrigation regimes and chitosan application. *Industrial Crops and Products*, *158*, 112990. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112990
7. Aminifard, M., Gholami, M., Bayat, H., & Moradinezhad, F. (2020). Effect of fulvic acid and amino acid application on physiological characteristics, growth and yield of coriander (*Coriandrum sativum* L.) as a medicinalplant. *Journal of Agroecology*, *12*(3), 373-388. https://doi.org/10.22067/jag.v12i374672
8. Arnon, D.I. (1975). *Physiological Principles of Dry Land Crop Production*. In: U.S.Gupta (Ed.) Physiological Aspects of Dry Land Farming, 3-14. Oxford Press.
9. Asadi, M., Nasiri, Y., & Morshedloo, M. (2018). Evaluation of quantitative and qualitative yield of *Mentha piperita* under amino acids, organic and chemical fertilizers. *Suatainable Agriculture*, *82*(3), 257-275.

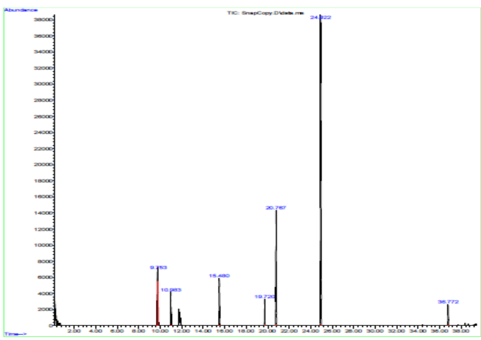
10. Askary, M., Behdani, M.A., Parsa, S., Mahmoodi, S., & Jamialahmadi, M. (2018). Water stress and manure application affect the quantity and quality of essential oil of *Thymus daenensis* and *Thymus vulgaris*. *Industrial Crops and Products, 111*, 336-344. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.056
11. Ashouri, R., Fallah, H., Niknezhad, Y., & Barari Tari, D. (2023). Effect of application of plant growth promoting bacteria and amino acids foliar application on growth characteristics, yield, and nutritional value of rice (*Oryza sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(3), 333-346. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81340.1230
12. Azarpira, E., Fathi, S., Sharafi, Y., & Najafian, S. (2020). Effect of some amino acids based biostimulants on medicinal mint (*Mentha spicat* L.) under salinity stress. *Horticultural Plant Nutrition, 2*(2), 154-173. (In Persian). https://doi.org/10.22070/hpn.2020.5012.1068
13. Babaei, K., Moghaddam, M., & Farhadi, N. (2021). Morphological, physiological and phytochemical responses of Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) to drought stress. *Scientia Horticulturae, 284*, 110-116. http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110116
14. Bohlman, J., & Keeling, C.I. (2008). Terpenoid biomaterials. *Plant Journal, 54*, 656-669. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03449.x
15. Caser, M., Chitarra, W., Angiolillod, F., & Perrone, I. (2019). Drought stress adaptation modulates plant secondary metabolite production in *Salvia dolomitica* Codd. *Industrial Crops and Products, 129*, 85-96. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.068
16. Danesh-Shahraki, H., Ghasemi Pirbalouti, A., & Rajabzadeh, F. (2023). Water deficit stress mitigation by the foliar spraying of salicylic acid and proline on the volatile oils and growth features of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). *Journal of Essential Oil-Bearing Plants, 26*, 115-129. https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2160279
17. Darvizheh, H., Zavareh, M., & Ghasmanjad, M. (2017). Effect of proline spraying on biochemical properties of *German chamomile* in water stress conditions (*Matricaria chamomilla* L). *Journal of Applied Research in Plant Ecophysiology, 4*, 35-60. http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-244-en.html
18. Dere, S., Güneş, T., & Sivaci, R. (1998). Spectrophotometric determination of chlorophyll-A, B and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. *Turkish Journal of Botany, 22*, 13-17. https://www.researchgate.net/publication/235938850
19. De Sousa, A., Elgawad, H.A., Fidalgo, F., Teixeira, J., Matos, M., & Hamed, B.A. (2020). Al exposure increases proline levels by different pathways in an Al-sensitive and an Al-tolerant rye genotype. *Scientific Reports, 10*, 16401. https://www.nature.com/articles/s41598-020-73358-9
20. Esch, E.H., Lipson, D.A., & Cleland, E.E. (2019). Invasion and drought alter phenological sensitivity and synergistically lower ecosystem production. *Ecology, 100*, 34-45. https://doi.org/10.1002/ecy.2802
21. Farahani, H., Sajedi, N.A., Madani, H., Changizi, M., & Naeini, M.R. (2020). Effect of foliar-applied silicon on flower yield and essential oil composition of Damask Rose (*Rosa damascena* Mill.) under water deficit stress. *Silicon, 13*, 4463-4472. https://doi.org/1007/s12633-020-00762-1
22. Fariaszewska, A., Aper, J., Van Huylenbroeck, J., & De Swaef, T. (2020). Physiological and biochemical responses of forage grass varieties to mild drought stress under field conditions. *International Journal of Plant Production, 14*, 335–353. https://doi.org/10.1007/s42106-020-00088-3
23. Ghanbarzadeh, Z., Mohsenzadeh, S., Rowshan, V., & Moradshahi, A. (2019). Evaluation of the growth, essential oil composition and antioxidant activity of *Dracocephalum moldavica* under water deficit stress and symbiosis with *Claroideoglomus etunicatum* and *Micrococcus yunnanensis*. *Scientia Horticulturae, 256*, 108652. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108652
24. Gohari, Gh., Feridoni, S., Panahi Rad, S., Sepehri, N., & Dadpour, M.R. (2020). Foliar application of phenylalanine on nutritional value in *Vitis vinifera* var. Hosseini. *Journal of Food Researches, 30*(4), 109-121. (In Persian). https://doi.org/10.22034/fr.2021.37105.1708
25. Hayati, A., Rahimi, M.M., Kelidari, A., & Hosseini, S.M. (2021). Effects of humic acid and iron nanochelate on osmolytes content of black cumin (*Nigella sativa* L.) under drought stress conditions. *Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 37*(5), 809-821. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.354715.2995
26. Hawrylak-Nowak, B., Dresler, S., Rubinowska, K., & Matraszek-Gawron, R. (2021). Eliciting effect of foliar application of chitosan lactate on the phytochemical properties of *Ocimum basilicum* L. and *Melissa officinalis* L. *Food Chemistry, 342*, 128358. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128358
27. Hazrati, S., Habibzadeh, F., Molaee, S., Masoompour, Z., & Asgharian, P. (2021). Phytochemical study and improving the essential oil yield of *Cuminum cyminum* L. by spraying the metabolic activator of pluramin and the growth regulator of bioxa under rainfed condition. *Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants, 9*(2), 22-38. (In Persian). https://doi.org/10.30495/ejmp.2021.694472

28. Heidarzadeh, A., & Modares Sanavi, S.A.M. (2023). Effects of various amino acids on quantitative and qualitative characters of *Allium sativum* L. *Plant Production, 46*(2). https://doi.org/10.22055/ppd.2023.42775.2071
29. Jafari, S.A., Khorshidi, J., Morshedloo, M.R., & Houshidari, F. (2021). Assessment of water deficit tolerance in some of Iranian native *Satureja* species using stress tolerance indices. *Journal of Plant Process and Function, 10*(44), 133-145. (In Persian). http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1400.10.44.6.2
30. Kazempour, A., Sharghi, Y., Modarres Sanavi, S.A.M., Zahedi, H., & Sefid Kon, F. (2023). Effect of amino acid foliar application on morphophysiological characteristics and thyme essential oil under different irrigation regimes. *Journal of Plant Process and Function, 12*(53), 71-90. (In Persian). http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1402.12.53.5.3
31. Kheiri, A., Mohajjel Shoja, H., & Sarajoughi, M. (2020). Study on the effect of drought stress and methanol spraying on dehydrine1 gene expression in *Carthamus tinctorius*. *Genetic Engineering and Biosafety Journal, 9*, 67-75. http://dorl.net/dor/20.1001.1.25885073.1399.9.1.4.7
32. Khorasani, H., Rajabzadeh, F., Mozafari, H., & Ghasemi Pirbalouti, A. (2023). Water deficit stress impairment of morphophysiological and phytochemical traits of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) buffered by humic acid application. *South African Journal of Botany*, *154*, 365-371. http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.030
33. Kulak, M. (2020). Recurrent drought stress effects on essential oil profile of Lamiaceae plants: An approach regarding stress memory. *Industrial Crops and Products, 154*, 1-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112695
34. Marinova, D., Ribarova, F., & Atanassaova, M. (2005). Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. *Journal University of Chemistry Technology Metallurgy, 40*(3), 255-260.
35. Mirjalili, A., Lebaschi, M.H., Ardakani, M.R., Heydari SharifAbad, H., & Mirza, M. (2020). Evaluation of morphological traits and yield of *Satureja bachtiarica* affected by density and organic fertilizers under dryland farming conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research, 18*(3), 357-371. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/gsc.v18i3.86519
36. Mohammadi, M., Sefidkon, F., Asadi-Sanam, S., & Kalatejari, S. (2021). Effects of nutritional treatments on morphological characteristics and essential oil yield of *Satureja khuzistanica* Jamzad. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 37*(2), 193-213. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.351383.2840
37. Moradi Marjaneh, E., Galavi, M., Ramroodi, M., & Soloki, M. (2018). Evaluation of some quantitative characters of *Rosmarinus officinalis* L. affected by foliar application of nutrition components and various harvesting time. *Crop Production, 11*(4), 119-134. https://doi.org/10.22069/ejcp.2019.13979.2064
38. Mozaffarian, V. (2008). *A Pictorial Dictionary of Botanical Taxonomy Latin-English-French-Germany-Persian*. Germany: Koeltz Scientific Books.
39. Mumivand, H., Ebrahimi, A., Morshedloo, M.R., & Shayganfar, A. (2021). Water deficit stress changes in drug yield, antioxidant enzymes activity and essential oil quality and quantity of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). *Industrial Crops and Products*, *164*, 113381. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113381
40. Nasiri, Y., Shekari, F., & Asadi, M. (2020). Effects of biofertilizers and zinc sulfate on some morphological and yield characteristics of *Satureja hortensis* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *36*(4), 523-541. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2020.341271.2685
41. Nouri, M., Rohbani, M., & Mahboub, S.A. (2015). *Biochemistry, International Student Edition (3rd edition)*. Ahrar Tabriz Publications, Tabriz, Iran. pp: 768. (In Persian).
42. Padid, T., Javdi, H., Seghatoleslami, M.J., & Moosavi, S.G.H. (2021). The responses of yield and some morpho-physiological traits of savory (*Satureja hortensis*) to sowing date and irrigation levels in Birjand. *Iranian Journal of Field Crop Science, 52*(3), 209-218. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.301799.654716
43. Pradhan, J., Sahoo, S.K., Lalotra, S., & Sarma, R.S. (2017). Positive impact of abiotic stress on medicinal and aromatic plants. *International Journal of Plant Sciences, 12*(2), 309-313. https://doi.org/10.15740/HAS/IJPS/12.2/309-313
44. Poorghadir, M., Mohammadi Torkashvand, A., Mirjalili, S.A., & Moradi, P. (2020). Interactions of amino acids (proline and phenylalanine) and biostimulants (salicylic acid and chitosan) on the growth and essential oil components of savory (*Satureja hortensis* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 30*, 101815. http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101815
45. Raoof Haghparvar, F., Hashemabadi, D., & Kaviani, B. (2022). Effect of arginine, proline and glutamine amino acids on morphological and physiological traits of two african marigold (*Tagetes erecta* L.) cultivars. *Journal of Ornamental Plants*, *12*(3), 191-202. (In Persian).
46. Sanikhani, M., Akbari, A., & Kheiry, A. (2020). Effect of phenylalanine and tryptophan on morphological and physiological characteristics in colocynth (*Citrullus colocynthis* L.). *Journal of Plant Process and Function, 9*(35), 317-328. (In Persian). http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1399.9.35.5.6

47. Saremi, S., Gholipour, M., Abasdokht, H., Naghdibadi, H.A., MehrAfarin, A., & Asghari, H.R. (2021). Evaluation of effect of foliar application of various amino acids on the biochemical responses of *Physalis alkekengi* L. *Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants, 9*(2), 39-52. (In Persian). https://doi.org/10.30495/ejmp.2021.694469
48. Sasani, N., Pâques, L.E., Boulanger, G., & Singh, A.P. (2021). Physiological and anatomical responses to drought stress differ between two larch species and their hybrid. *Trees, 35*, 1467-1484. https://doi.org/10.1007/s00468-021-02129-4
49. Shafie, F., Bayat, H., Aminifard, M.H., & Daghighi, S. (2021). Biostimulant effects of seaweed extract and amino acids on growth, antioxidants, and nutrient content of yarrow (*Achillea millefolium* L.) in the field and greenhouse conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52*, 964-975. http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2021.1872596
50. Shaykh-Samani, A., Ghasemi Pirbalouti, A., Yadegari, M., & Rajabzadeh, F. (2023). Foliar application of salicylic acid improved the yield and quality of the essential oil from *Dracocephalum kotschyi* Boiss. under water deficit stress. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, *26*, 769-779. https://doi.org/10.30495/iper.2022.1952014.1771
51. Soroori, S., Danaee, E., Hemmati, K., Moghadam, A.L., & Garmsar, I. (2021). Effect of foliar application of proline on morphological and physiological traits of *Calendula officinalis* L. under drought stress. *Journal of Ornamental Plants, 11*, 13-30. https://dorl.net/dor/20.1001.1.22516433.2021.11.1.1.8
52. Taraseviciene, Z., Velicka, A., & Paulauskiene, A. (2021). Impact of foliar application of amino acids on total phenols, phenolic acids content of different mints varieties under the field condition. *Plants, 10*(3), 599. http://dx.doi.org/10.3390/plants10030599
53. Wafaa, H.A., Rania, M.R., & El-Shafay, R.M.M. (2021). Effect of spraying with extracts of plants and amino acids on growth and productivity on *Coriandrum sativum* L. plants under shalateen condition. *Plant Archives, 21*(1), 300-307. http://dx.doi.org/10.51470/Plantarchives.2021.v21.S1.048
54. Yadegari, M. (2022). Effects of NPK, botamisol, and humic acid on morphophysiological traits and essential oil of three *Satureja* species under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 38*(1), 61-80. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.356264.3073
55. Yadegari, M. (2017). Irrigation periods and Fe, Zn foliar application on agronomic characters of *Borago officinalis*, *Calendula officinalis*, *Thymus vulgaris* and *Alyssum desertorum*. *Communication in Soil Science and Plant Analysis, 48*(3), 307–315. https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1269796
56. Zakerian, F., Sefidkon, F., Abbaszadeh, A., & Kalateh, S. (2020). Drought stress and micorrhiza fungi effects on physiologic and essential oil traits of *Satureja sahandica* Bornm. *Iranian Journal of Horticultural Science, 51*(1), 189-201. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.267489.1521
57. Zandalinas, S.I., Mittler, R., Balfagon, D., Arbona, V., & Gomez-Cadenas, A. (2017). Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiology of Plant, 162*(1), 2–12. https://doi.org/10.1111/ppl.12540

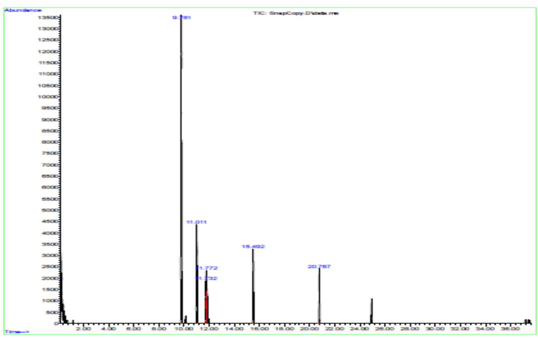
پیوست: کروماتوگرام یونی کل (TIC) اندام هوایی مرزه بختیاری به‌وسیله GC/MS در تیمارهای مختلف

Appendix: Total ionic chromatogram of shoot of *S.bachtiarica* detected by GC/MS in various treatments



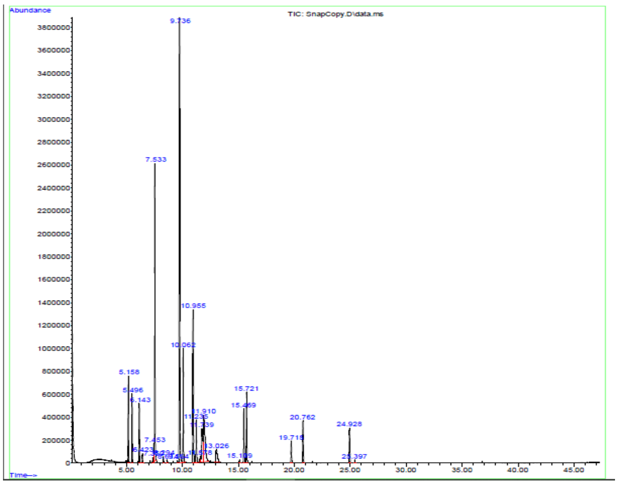
پیوست ۱- گیاهان تحت تیمار لیزین ۲/۵ گرم در لیتر-دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 1- Plants treated by lysine (2.5 g.l^{-1})- irrigation regime (3-day interval)



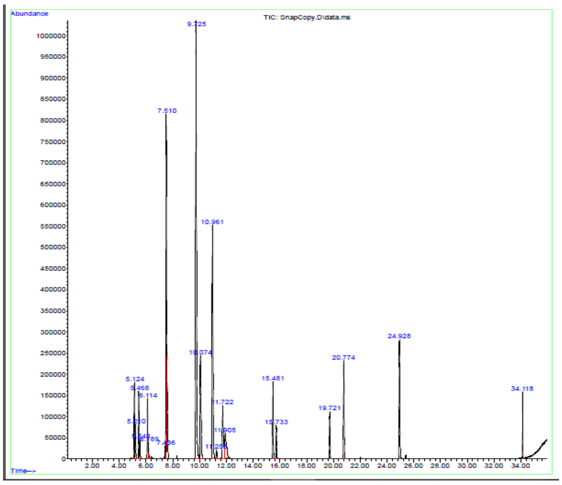
پیوست ۲- گیاهان تحت تیمار لیزین پنج گرم در لیتر-دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 2- Plants treated by lysine (5 g.l^{-1})- irrigation regime (3-day interval)



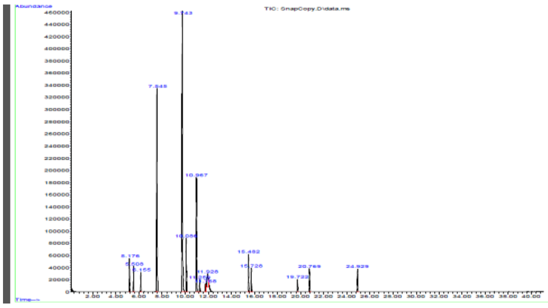
پیوست ۳- گیاهان تحت تیمار متیونین ۲/۵ گرم در لیتر- دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 3- Plants treated by methionine (2.5 g.l[-1])- irrigation regime (3-day interval)



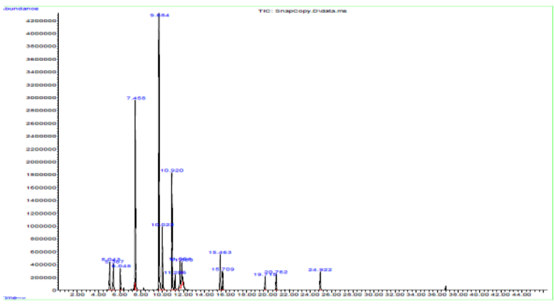
پیوست ٤- گیاهان تحت تیمار متیونین پنج گرم در لیتر-دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 4- Plants treated by methionine (5 g.l[-1])- irrigation regime (3-day interval)



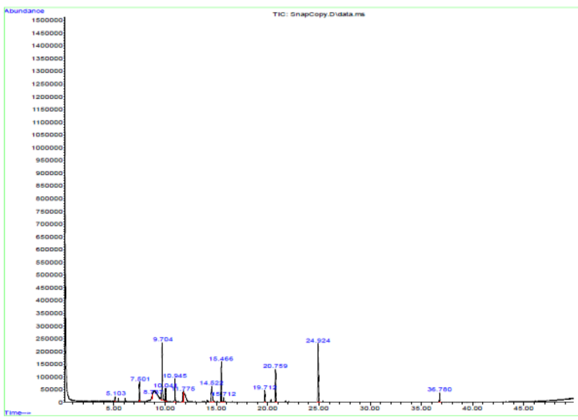
پیوست ۵- گیاهان تحت تیمار فنیل آلانین ۱۰۰ میکرومولار-دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 5- Plants treated by phenylalanine (100 µM)- irrigation regime (3-day interval)



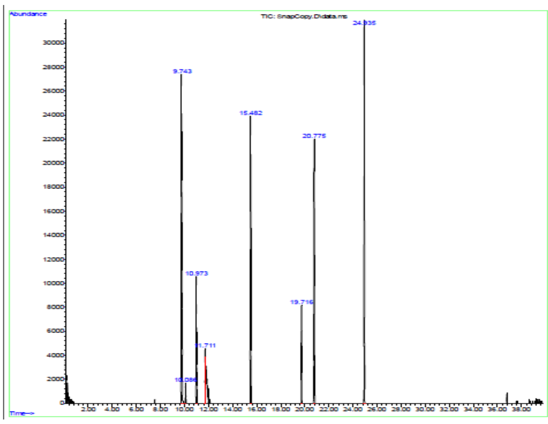
پیوست ٦- گیاهان تحت تیمار فنیل آلانین ۲۰۰ میکرومولار-دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 6- Plants treated by phenylalanine (200 µM)- irrigation regime (3-day interval)



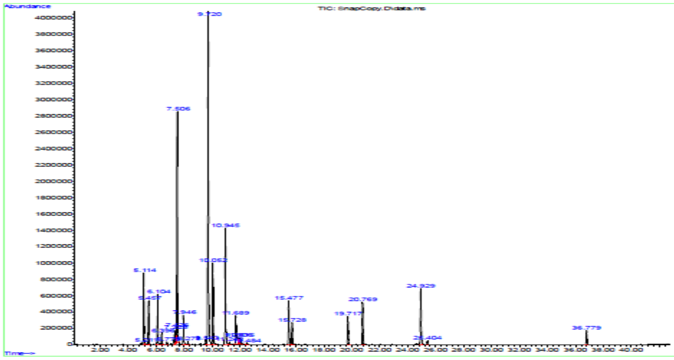
پیوست ۷- گیاهان تحت تیمار پرولین ۵۰۰ میکرومولار- دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 7- Plants treated by proline (500 µM)- irrigation regime (3-day interval)



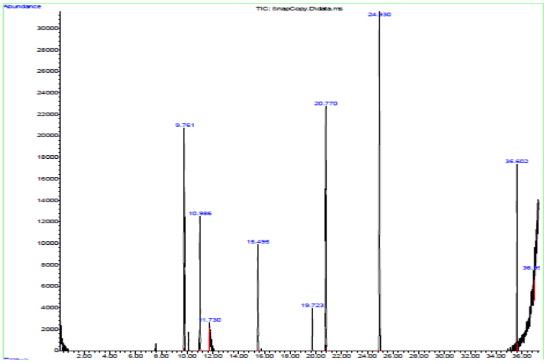
پیوست ۸- گیاهان تحت تیمار پرولین ۱۰۰۰ میکرومولار-دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 8- Plants treated by proline (1000 µM)- irrigation regime (3-day interval)



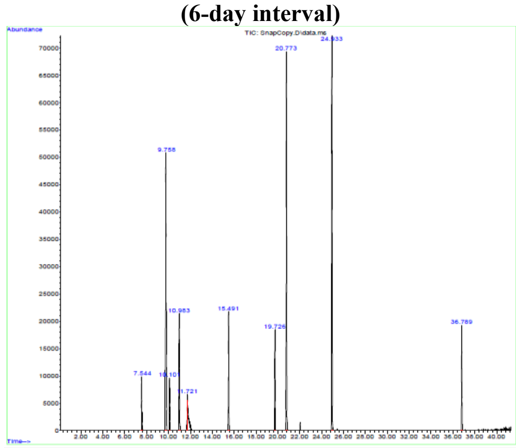
پیوست ۹- گیاهان تحت تیمار لیزین ۲/۵ گرم در لیتر-دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 9- Plants treated by lysine (2.5 g.l-1)- irrigation regime (6-day interval)



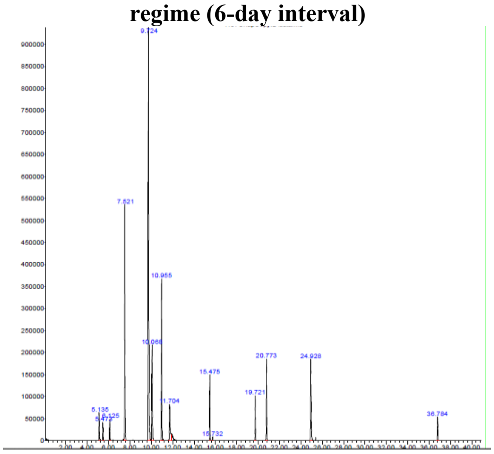
پیوست ۱۰- گیاهان تحت تیمار لیزین پنج گرم در لیتر-دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 10- Plants treated by lysine (5 g.l-1)- irrigation regime (6-day interval)



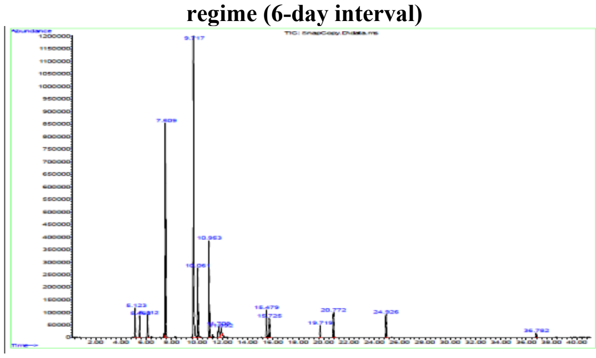
پیوست ۱۱- گیاهان تحت تیمار متیونین ۲/۵ گرم در لیتر- دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 11- Plants treated by methionine (2.5 g.l-1)- irrigation regime (6-day interval)



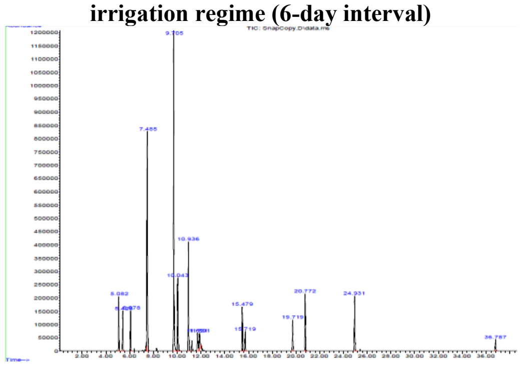
پیوست ۱۲- گیاهان تحت تیمار متیونین پنج گرم در لیتر-دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 12- Plants treated by methionine (5 g.l-1)- irrigation regime (6-day interval)



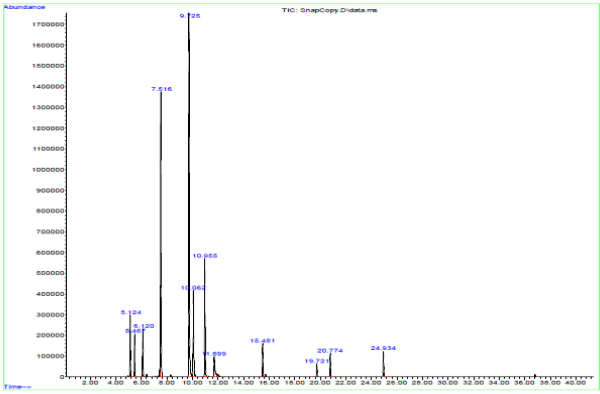
پیوست ۱۳- گیاهان تحت تیمار فنیل آلانین ۱۰۰ میکرومولار-دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 13- Plants treated by phenylalanine (100 µM)- irrigation regime (6-day interval)



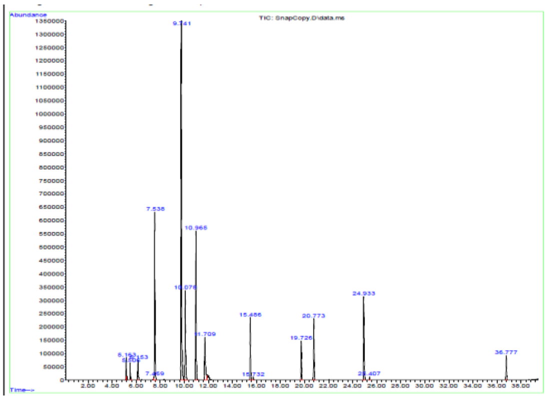
پیوست ۱٤- گیاهان تحت تیمار فنیل آلانین ۲۰۰ میکرومولار-دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 14- Plants treated by phenylalanine (200 µM)- irrigation regime (6-day interval)



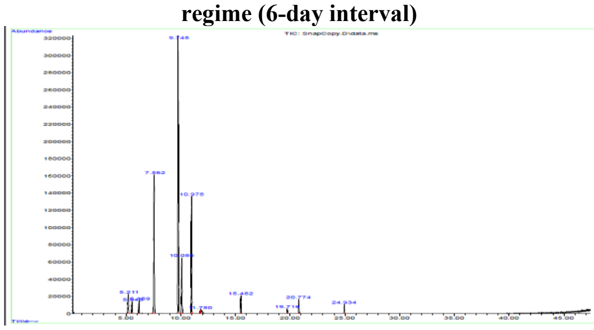
پیوست ۱۵- گیاهان تحت تیمار پرولین ۵۰۰ میکرومولار- دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 15- Plants treated by proline (500 µM)- irrigation regime (6-day interval)



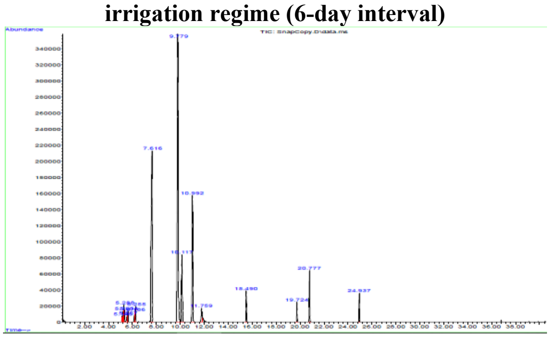
پیوست ١٦- گیاهان تحت تیمار پرولین ۱۰۰۰ میکرومولار-دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 16- Plants treated by proline (1000 µM)- irrigation regime (6-day interval)



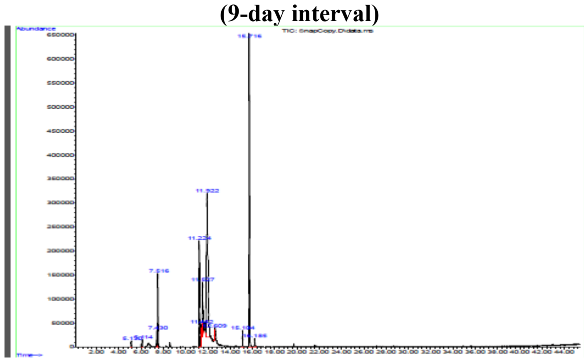
پیوست ۱۷- گیاهان تحت تیمار لیزین ۲/۵ گرم در لیتر-دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 17- Plants treated by lysine (2.5 g.l^-1^)- irrigation regime (9-day interval)



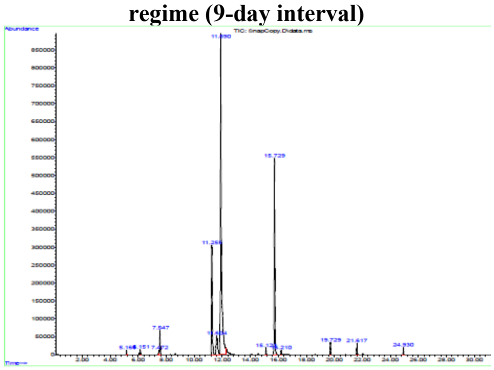
پیوست ۱۸- گیاهان تحت تیمار لیزین پنج گرم در لیتر-دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 18- Plants treated by lysine (5 g.l^{-1})- irrigation regime (9-day interval)



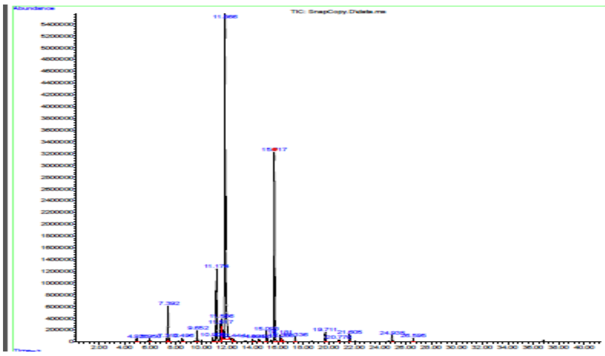
پیوست ۱۹- گیاهان تحت تیمار متیونین ۲/۵ گرم در لیتر- دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 19- Plants treated by methionine (2.5 g.l^{-1})- irrigation regime (9-day interval)



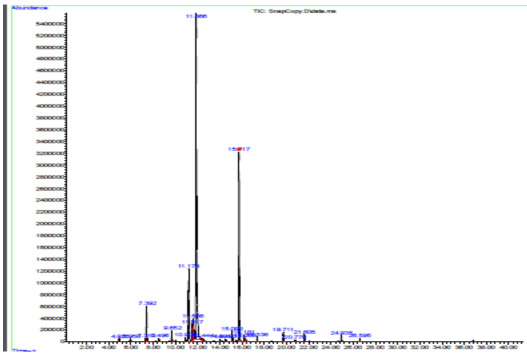
پیوست ۲۰- گیاهان تحت تیمار متیونین پنج گرم در لیتر-دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 20- Plants treated by methionine (5 g.l^{-1})- irrigation regime (9-day interval)



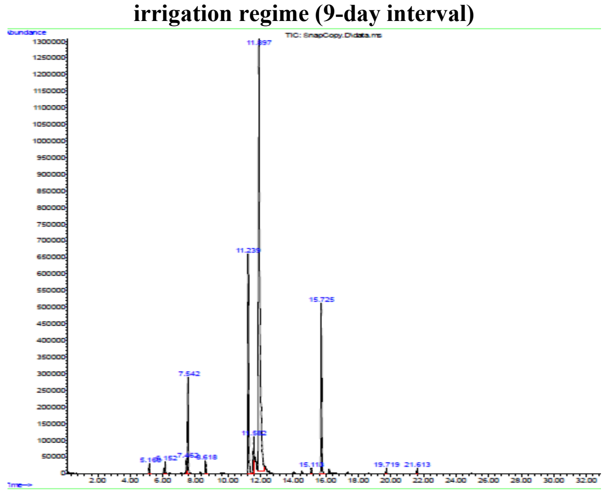
پیوست ۲۱- گیاهان تحت تیمار فنیل آلانین ۱۰۰ میکرومولار-دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 21- Plants treated by phenylalanine (100 µM)- irrigation regime (9-day interval)



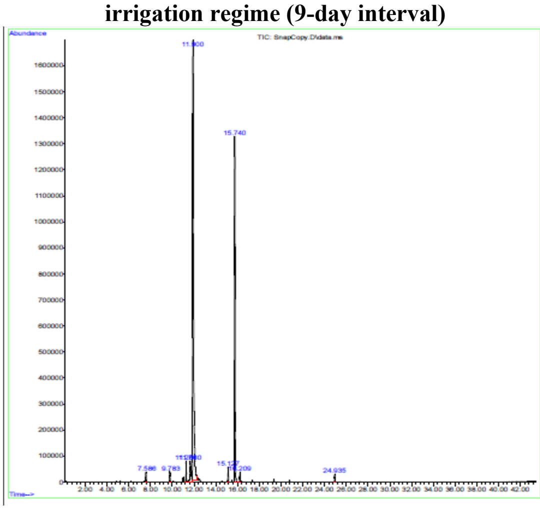
پیوست ۲۲- گیاهان تحت تیمار فنیل آلانین ۲۰۰ میکرومولار-دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 22- Plants treated by phenylalanine (200 µM)- irrigation regime (9-day interval)



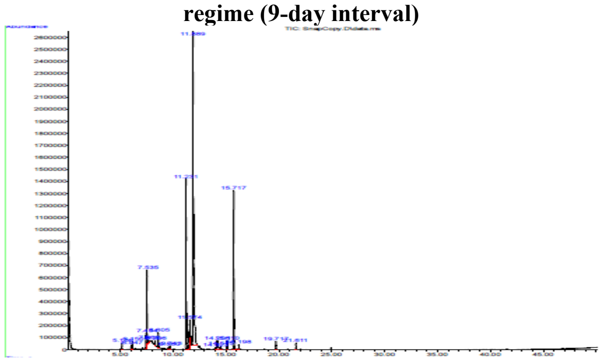
پیوست ۲۳- گیاهان تحت تیمار پرولین ۵۰۰ میکرومولار- دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 23- Plants treated by proline (500 µM)- irrigation regime (9-day interval)



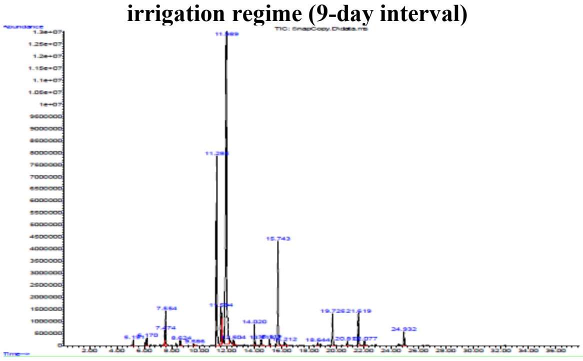
پیوست ۲٤- گیاهان تحت تیمار پرولین ۱۰۰۰ میکرومولار-دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 24- Plants treated by proline (1000 µM)- irrigation regime (9-day interval)



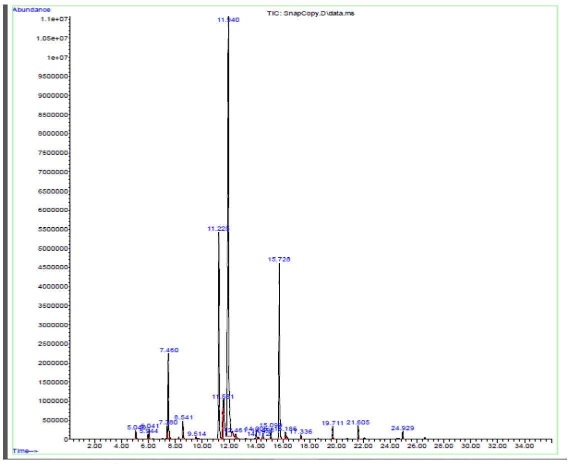
پیوست ۲۵- گیاهان تحت تیمار شاهد- دور آبیاری سه روز یک‌بار

Appendix 25- Plants treated by control - irrigation regime (3-day interval)



پیوست ۲٦- گیاهان تحت تیمار شاهد- دور آبیاری شش روز یک‌بار

Appendix 26- Plants treated by control- irrigation regime (6-day interval)



پیوست ۲۷- گیاهان تحت تیمار شاهد- دور آبیاری نُه روز یک‌بار

Appendix 27- Plants treated by control- irrigation regime (9-day interval)